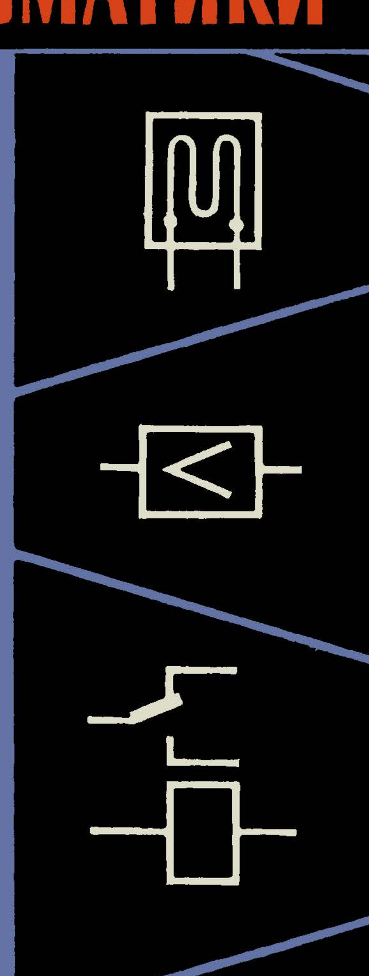
А.Г. СОБОЛЕВСКИЙ



ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ



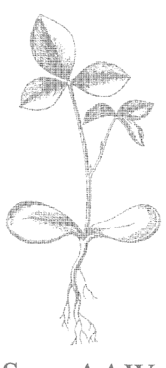


МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 569

А. Г. СОБОЛЕВСКИЙ

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ





ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.398.69
С 54

В любом автоматическом устройстве есть датчики, усилители и реле. Из этих элементов, как из кубиков, может быть собран и простейший автомат для включения электроосвещения и сложнейший автоматический регулятор.

Вот об этих основных элементах автоматики и рассказывается в книге. Она предназначена для первоначального знакомства с электронной автоматикой, а также для радиолюбителей, которые хотели бы работать в области применения радиотехники в народном хозяйстве. Предполагается, что читатель знаком с основами электротехники и радиотехники.

Соболевский Анатолий Георгиевич

Элементы систем автоматики

М.—Л., издательство „Энергия", 1965 г. 96 стр. с илл.
(Массовая радиобиблиотека. Вып. 568)
Тематический план 1964 г., № 333

Редактор *В. М. Белостоцкий* Техн. редактор *В. Н. Малькова*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 27/XI 1964 г. Подписано к печати 16/I 1965 г.
Т-00415 Бумага 84×108 1/32 4,92 уч.-изд. л., 6,82 печ. л.
Тираж 87 000 Цена 27 коп. Заказ 1683

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати,
Шлюзовая наб., 10.

О ЧЕМ ЭТА КНИГА?

Чуть-чуть о будущем человечества

Задумывались ли вы над тем, что темп жизни человечества все время возрастает? Образно выражаясь, колесо истории из века в век вращается все быстрее. В самом деле, в истории было время, когда проходили века и даже тысячелетия, а в жизни людей ничего не изменялось. Да и не так давно появилось в обиходе человека это короткое и быстрое слово — век. Фараоны, например, еще не думали о веках: они воздвигали свои пирамиды в расчете на тысячелетия. И может быть в этом надо видеть не только безудержную манию величия, но и привычный для древних счет времени — они мыслили тысячелетиями.

Мы ведем счет годами. Для нас пятнадцать — двадцать лет — чуть ли не эпоха! Чем вызвано такое различие?

Вспомните, сколько раз за какие-нибудь шестьдесят лет — на протяжении жизни всего одного поколения! — изменялось название нашего века. В начале столетия думали, что это будет век электричества. В то время люди были способны прийти в восторг от простого электрического выключателя. Электрический свет, электромоторы, радио — для них это было чудом. Но прошло сорок лет, и начали пророчить, что скоро у нашего века будет новое, прямо-таки фантастическое имя — век атомной энергии. Правда, атомная энергия пока приводит в действие все те же старые паровые машины, заменив собой только уголь. Но ведь по существу мы еще не овладели атомной энергией. Когда мы покорим плазму, научимся без промежуточных преобразователей переводить грозную энергию атома в послушную электрическую, вот тогда действительно начнется век атомной энергии. Когда это будет?— может быть через десять, а может быть через тридцать лет. Но не через сто, не через тысячу, а еще в нашем столетии!

Казалось бы, дальше некуда, таких свершений хватило бы на десятки предыдущих веков. Но вспомните, после постройки первой атомной электростанции прошло всего несколько лет, а двадцатый век уже стали называть веком космоса. И хотя надо признать, что мы еще только-только приоткрыли дверь в космос и до подлинного «века космоса» еще далеко, но разве такая смена названий нашего века на протяжении всего шестидесяти лет не говорит сама за себя?

Как-то я был свидетелем разговора на эту тему с одним крупным ученым. Его спросили, какое же имя останется за нашим веком в истории? Впрочем, поправлюсь: в истории науки, ибо об истории человечества говорить не приходится, там наш век стоит особняком — начало эры коммунизма!

«Трудно сказать,— ответил ученый.— Мы живем в такое время, когда многие привычные представления в науке пересматриваются. И происходят открытия, о возможности которых еще недавно и не подозревали. Поэтому не берусь предсказывать, что еще будет открыто за оставшиеся десятилетия нашего века. Но знаете, бывают открытия принципиальные, а бывают второстепенные. Принципиальные открывают новые горизонты, резко переводят возможности людей на совершенно иную ступень, предлагают человечеству такие решения, о которых еще вчера нельзя было серьезно говорить. О таких открытиях, о времени, когда они произошли, помнят долго. И очень может быть, что в конце концов наш век будут вспоминать, как век начала кибернетики».

Этот разговор был несколько лет назад. Тогда я сомневался в правоте ученого. Но позднее я понял, почему он из всех грандиозных событий нашего столетия выбрал на первый взгляд не очень значительное — зарождение кибернетики. А чтобы понять это, мне пришлось по-новому взглянуть на очень привычные вещи, задуматься над, казалось бы, простыми вопросами.

Вот к примеру: что такое техника? Обычно говорят так: это машины и механизмы, работающие на человека и помогающие ему. А я представил себе, что машины — это руки и ноги человека, его мускулы, глаза, уши. Автомобили делают человека скороходом. Экскаватор — это его гигантская рука. Телевизор — сверхдальнозоркие глаза. Конечно, так думать наивно, но вы не станете отрицать, что машины усиливают физическую силу человека, они его стальные мускулы. И замечательно, что они созданы по существу не напряжением физических сил человека, а его «интеллектуальной силой», его разумом.

Но если до сих пор человек создавал машины, умножающие его физические силы, то теперь он начинает создавать машины, которые служат усилителями его разума! Не улыбайтесь — разве электронные вычислительные машины, в течение нескольких минут решающие сложнейшие математические задачи, на что раньше уходили недели труда многих людей, не являются помощниками разума человека?!

У таких машин великое будущее. Вдумайтесь: шагающий экскаватор производит в сотни раз бóльшую работу, чем рука человека, стоящего за пультом управлении. Если «интеллектуальные машины» будут столь же мощны по сравнению с человеческой памятью и быстротой мышления, то представляете, какими темпами будет развиваться прогресс, насколько участится ритм жизни! И, может быть, людям уже недалекого будущего наша сегодняшняя жизнь покажется вовсе не такой стремительной, какой мы ее себе представляем. Судите сами: все, чем сегодня занят рабочий у станка, шофер за рулем или летчик за штурвалом, бухгалтер за письменным столом, строитель, библиотекарь,— словом, многие миллионы людей — в будущем будет заботой машин. А на долю человека останется такое, что сейчас даже трудно представить: управлять «думающими» машинами! Машинами-инженерами, машинами-математиками ... Какая интересная жизнь ждет человечество!

Но почему я заговорил об этом в книге, которая не претендует на рассказ о кибернетике? Если вы прочли аннотацию, то знаете, что задача этой книги прозаичнее: вместо разговора о «думающих» машинах мы займемся всего лишь элементами автоматики — датчиками, усилителями и реле. Какое отношение они имеют к векам, фараонам и далеким горизонтам науки?

Прямого отношения, конечно, не имеют. И все же я не стал вычеркивать предыдущие страницы, потому что не мешает посмотреть, как автоматика связана с другими отраслями науки и техники, какое влияние она оказывает на жизнь людей, как облегчит их труд. Именно поэтому я и заговорил о кибернетике. Впрочем, однажды я попытался говорить на эту тему с ребятами из кружка автоматики.

«Что вы,— остановили они меня.— Мы не занимаемся кибернетикой. У нас кружок автоматики, а кибернетика — это вот!» — и они показали мне толстенную книгу, страницы которой были густо испещрены математическими формулами.

Как они были неправы! Испугавшись формул, они не разглядели главного. Да, кибернетика изучает законы управления, стремится описать их математическими уравнениями, сделать доступными математическому анализу. Между прочим, в свое время некоторые говорили, что никакой кибернетики вообще нет, есть только автоматика и теория автоматического регулирования. «Создавали же раньше автоматы без всякой кибернетики»,— заявляли они. Но это только так кажется, что без кибернетики. Люди издавна, сами того не подозревая, пользовались законами кибернетики. Науки с таким названием, правда, не было, но ее законы существовали.

Кибернетика и автоматика — это разные, но тесно связанные науки. Не надо их путать: автоматика занимается только техническими средствами контроля и управления; кибернетика же, образно говоря, не интересуется, как устроен предмет, который она рассматривает (т. е. человек ли это или техническое устройство, или может быть это человеческое общество — для кибернетики это безразлично!). Кибернетика интересуется только тем, как этот предмет реагирует на внешние силы, воздействующие на него. Именно поэтому выводы кибернетики применимы и в технике, и в биологии, и в человеческом обществе.

Как видите, с появлением кибернетики автоматика не утратила своего значения, не ушла в прошлое. Наоборот, кибернетика подчеркнула значение автоматики, и не случайно наша программа строительства коммунизма отводит автоматике такое важное место. Если кибернетика указывает способ поднять производительность труда человека до фантастических размеров, дает ему в помощники «интеллектуальные машины», то автоматика — это средство достигнуть такой производительности, это тот инженер, который построит эти машины.

Вот почему, упомянув о кибернетике и ее сказочных возможностях, мы решили предложить вам уделить внимание автоматике, и даже не автоматике в целом, а ее элементам.

Знаете, без малого нет большого, а мелочи в технике — это то, из чего можно собрать все, от детской заводной игрушки до космического корабля. И надо не только быть смелым в творчестве, уметь смотреть на привычные вещи по-новому, но и досконально знать обширный арсенал техники. Как художник умеет из бесчисленных цветовых оттенков найти самый нужный, так и человек техники должен

уметь из множества конструкций отобрать самую подходящую. А для этого надо их знать. Ведь нет смысла каждый раз изобретать уже изобретенное или, как говорят, «открывать уже открытую Америку».

Впрочем, это очень не простое условие: знать все уже изобретенное и открытое. Лет сто назад это еще можно было, но сейчас... Помню, в одном очень авторитетном докладе утверждалось, что в наше время во всем мире выходит такое огромное количество литературы по всем вопросам науки и техники, что никакие библиографы не могут справиться с систематизацией всех книг, журналов, газет, бюллетеней, проспектов, обзоров, сборников, рефератов, выходящих на сотнях языков в разных странах. В этом же докладе совершенно серьезно говорилось, что сейчас в некоторых случаях выгоднее и проще самостоятельно произвести опыт или сконструировать нужную машину, нежели разыскивать в литературе описание этого опыта или чертежи машины, хотя наверняка известно, что это где-то есть.

Надо сказать, что это одна из величайших проблем — справиться с гигантским и все растущим потоком научной и технической информации. Если это не будет сделано, человечество в конце концов зайдет в тупик и всю энергию начнет тратить на изобретение уже изобретенного и открытие уже открытого. Надо надеяться, что люди не допустят такой бесполезной траты сил, и поможет им в этом все та же кибернетика.

И если уже в наше время так не просто знать все хотя бы даже в узкой области науки и техники, то тем необходимее хорошо изучить законы, по которым работают уже созданные машины, и те основные элементы, из которых состоят эти машины. Ибо множество самых непохожих друг на друга машин работает по одним и тем же законам, а их основные узлы, внешне такие различные, принципиально одинаковы. Поэтому, рассказывая о какой-либо области техники, надо в первую очередь упомянуть о ее основах. Вот этим мы и займемся в отношении автоматики.

Азбука автоматики

Поговорим о системах автоматики. Вот, к примеру, самый простой случай управления: надо поддерживать в электрической печи определенную температуру. Если это задание поручить человеку, то он по термометру определит температуру в печи, мысленно сравнит ее с заданной и, если есть расхождение, соответствующим образом передвинет ручку реостата, изменив подачу электроэнергии в печь. Если же это задание поручить автомату, то принципиальная схема его работы будет в точности такая же, как у человека: измерение (или контроль) температуры, сравнение результата с заданной температурой и ликвидация расхождения путем изменения подачи электроэнергии в печь. Однако технические средства управления будут уже другими.

Прежде всего автомат не умеет пользоваться термометром. Ему нужно специальное устройство для контроля температуры. Это устройство носит название датчика (чувствительного элемента). Он измеряет величину (в нашем случае — температуру), подлежащую регулированию, и преобразует ее в величину другого вида, а чаще всего в электрическое напряжение или ток, так как они значительно

более удобны для дальнейших превращений и воздействий на различные органы автомата.

Сигнал от датчика поступает на управляющий орган автомата. Это его «мозг». Восприняв сигнал от датчика, управляющий орган сравнивает температуру в печи с заданной и при наличии расхождения подает соответствующую команду на исполнительный орган, который восстанавливает заданную температуру, регулируя подачу электроэнергии в печь.

Изобразим схематически отдельные узлы автомата — например, прямоугольниками. Тогда получится так называемая структурная схема системы автоматического регулирования (рис. 1). Обратите внимание — эта система замкнутая. Объект регулирования через датчик воздействует на управляющий орган, а тот через исполнительный орган воздействует на объект регулирования. Однако часто автомату поручают только контроль за работой какого-либо устройства. Тогда он работает по системе автоматического контроля; в этом случае его структурная схема разомкнута, т. е. содержит только первую — контрольную—часть системы автоматического регулирования. Возможна и система автоматического регулирования, когда автомат занимается только управлением объектом по заранее заданной программе, без контроля поведения управляемого объекта. В этом случае его структурная схема повторяет вторую — управляющую — часть системы автоматического регулирования.

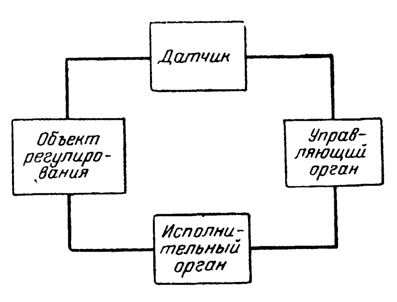


Рис. 1.

В настоящее время в автоматике существует очень много разнообразных схем самого различного назначения. Но все они в том или ином виде повторяют эти «классические» системы: систему автоматического контроля, систему автоматического управления и совокупность их — систему автоматического регулирования.

Поэтому напрашивается вывод: если они работают по одним и тем же структурным схемам, то они должны состоять из одинаковых, хотя бы принципиально, элементов.

Вспомните детский «Конструктор». Из нескольких основных элементов — площадок, осей, полосок металла с отверстиями — можно собрать и модель автомобиля, и подъемный кран, и коляску для куклы. В автоматике тоже есть «Конструктор»: набор основных элементов, из которых можно собрать любую автоматическую систему.

О некоторых из этих элементов уже говорилось. Например, о датчике. В самом деле, в любой автоматической системе вне зависимости от назначения и конструкции будет присутствовать датчик, если только система выполняет функции контроля. Потому-то датчик и считают одним из основных элементов автоматики.

Впрочем, вначале поговорим об основных элементах автоматики, так сказать, теоретически.

Работу любого элемента автоматики можно представить следующим отвлеченным образом. На входе элемента имеется некоторая

входная величина. Назовем ее X. При поступлении ее на вход элемента на его выходе появляется величина Y, определенным образом зависящая от входной величины X. Таким образом, задача любого элемента автоматики состоит в преобразовании входной величины X. Какое же это преобразование?

Начнем с датчика. Назначение его в том, чтобы преобразовать величину X, интересующую автоматическую систему, в величину Y, удобную для дальнейшей «работы» над ней в системе. Надо прямо сказать, что величина Y на выходе датчика в подавляющем большинстве случаев бывает электрической. На выходе датчика появляется электрическое напряжение или ток, изменение которых определенным образом отражает изменение величины X на входе датчика, причем величина X может быть любой природы: механические перемещения, температура среды, интенсивность света, напряженность магнитного поля и пр. По сути дела назначение датчика—преобразование входной неэлектрической величины X в электрическую величину Y.

Стремление к такому преобразованию вполне понятно: современная автоматика — это в большинстве случаев электронные устройства, так как работать с электрическим напряжением и током куда легче, нежели иметь дело с огромными механическими усилиями или испепеляющими температурами. Но так было далеко не всегда. Автоматика родилась значительно раньше электроники, и вначале ее мускулы и нервы были механическими и пневматическими, а в ее жилах текла жидкость, а не электрический ток. Только много лет спустя автоматика «пристрастилась» к электричеству. И не последнюю роль в этом сыграло то, что электрический ток легко усиливать.

В дальнейшем вы убедитесь, что сигналы датчиков обычно очень слабы и не могут без усиления приводить в действие исполнительные механизмы, например, реле, тяговые электромагниты, пускатели и т. д.

Кстати, усилением в автоматике занимаются специальные элементы — усилители. Это второй основной «кирпичик» автоматических устройств. Если говорить о них техническим языком, то окажется, что в усилителе также происходит преобразование входной величины X в выходную величину Y, но в этом участвует вспомогательный источник питания Z. Так вот, работа усилителя заключается в том, что малая входная величина X управляет переходом энергии из мощного источника Z в выходную величину Y, которая благодаря этому много больше входной величины X, но повторяет ее по форме, следует за ней во всех ее изменениях.

В настоящее время известно много типов усилителей: ламповые, полупроводниковые, магнитные, электромашинные, диэлектрические и еще значительное число других. В автоматике применяются любые усилители — все зависит от назначения аппарата и условий, в которых работает автоматика. Но наиболее часто применяются ламповые, магнитные и полупроводниковые усилители. Правда, раньше, до «эры» электроники, применялись различные неэлектрические усилители: механические, гидравлические, пневматические. Собственно, они и сейчас применяются, только реже и в сравнительно простых автоматических устройствах.

В самое последнее время, однако, были предложены системы пневмоавтоматики, которые собираются из отдельных элементов, выполняющих те же функции, что и электронные устройства, т. е.

усилителей, генераторов, ячеек памяти и многих других. В ряде случаев такие пневматические схемы оказываются значительно проще и надежнее электронных и в дальнейшем, возможно, сильно потеснят электронные устройства. Иногда электронные схемы вообще нельзя применять, например в условиях взрывоопасной атмосферы, и тогда использование пневмосхем оказывается единственно возможным решением. В 1964 г. группа ученых и конструкторов, разработавшая унифицированную систему элементов пневмоавтоматики (УСЭППА), получила за эту работу Ленинскую премию.

Третий основной элемент автоматики — реле. У этого элемента особый характер. Он работает скачками. При достижении входной величиной X определенного значения — величины срабатывания — выходная величина Y изменяется скачком и затем при увеличении входной величины X остается без изменения (или почти без изменения). Наоборот, обратное уменьшение входной величины X при некотором значении — пороге отпускания — приводит к скачкообразному возвращению выходной величины Y к первоначальному значению.

Основное назначение реле — служить включателем или выключателем, причем одновременно реле может усиливать входную величину X: достигнет входная величина X определенного значения — реле сработает и включит в цепь большую выходную величину Y. Или наоборот — выключит величину Y из цепи. Правда, реле усиливает не так, как это делает настоящий усилитель, в котором выходная величина повторяет по форме входную, но только в большем масштабе. Реле усиливает скачком, не заботясь о соблюдении масштаба и формы входной величины, но во многих случаях требуется именно такое усиление. Например, нажал оператор на маленькую кнопку, а реле сработает и подаст в линию электропередачи высокое напряжение или большой ток в электромоторы.

Вот три основных элемента автоматики, о которых пойдет речь в этой книге. Давайте посмотрим, что у них внутри, разберем их до винтиков и гаечек.

ДАТЧИКИ

Электронные органы чувств

Я уже говорил, что датчики — это органы «чувств» автоматических устройств, их глаза, уши, органы обоняния и осязания. И замечу, что в отличие от человека, у которого только пять органов чувств, у автомата их может быть значительно больше. Правда, не всегда автомату надо и видеть, и слышать, и осязать одновременно, в большинстве случаев ему достаточно только одного из этих «чувств», но зато ему иногда приходится «ощущать» такие явления, почувствовать которые человек не может. Например, анализировать состав газов, следить за инфракрасным излучением, измерять сверхвысокие давления или температуру межпланетного пространства. Как видите, набор «органов чувств», необходимый автоматике, весьма обширен.

Надо сказать, что с датчиками связано много проблем. И если прогресс в современной технике во многом определяется успехами автоматики, то одна из самых трудных и ответственных проблем при

автоматизации производства — это разработка соответствующих датчиков, способных отображать и контролировать автоматизируемые процессы. Часто именно отсутствие нужных датчиков задерживает развитие автоматики, потому что если нет датчика, способного, скажем, заглянуть внутрь доменной печи, выдержать колоссальную температуру в ней и очень тонко прореагировать на изменение этой температуры, то о каком автомате для управления доменной печью может идти речь? Такой автомат будет в положении врача, лишенного возможности поставить больному термометр. А в химии дело еще сложнее. Там надо одновременно измерять и температуру, и давление, и скорость протекания химического процесса и контролировать еще десятки других параметров! Бывает, что в принципе управление каким-нибудь процессом вполне можно автоматизировать. Известно, как должна быть построена схема управления, как должны изменяться отдельные параметры процесса, как надо регулировать работу тех или иных устройств, чтобы в результате получить нужное вещество. Часто даже не нужно создавать новый автомат, а можно приспособить уже имеющийся. Словом, как автоматизировать данный процесс — это не проблема. Но нет датчиков, способных сообщить автомату о каких-то определенных параметрах процесса, и все застопорилось. Приходится ждать, и иногда долго!

Но, конечно, не надо думать, что с датчиками дело обстоит так уж плохо. Как вы помните, датчик по существу предназначен для преобразования данной величины в электричеекое напряжение или ток. Так вот, сейчас почти любая физическая или химическая величина может быть преобразована в электрическое напряжение или ток при помощи соответствующих датчиков, причем часто разного принципа действия и весьма разнообразных конструкций.

Какие же это датчики? Как они устроены?

Так как датчиков очень и очень много, то начнем с их классификации. Можно классифицировать датчики по принципу действия и по тем явлениям, для отображения которых они предназначены, например: механическое перемещение или движение, температура, усилие, скорость движения, радиация (световая, ядерная) и пр. Эта классификация хорошо отражает назначение и область применения датчика, и поэтому мы о ней еще будем говорить. Но начать рассказ о датчиках удобнее с принципа их действия.

Кстати, все датчики по виду их выходной электрической величины можно разделить на две большие группы: параметрические датчики и генераторные. Первые преобразуют входную контролируемую величину в какой-либо параметр электрической цепи (например, сопротивление). Генераторные датчики преобразуют контролируемую величину в электродвижущую силу.

Изменяющееся сопротивление — это уже датчик

Датчики активного сопротивления обычно применяют для преобразования величины механического перемещения в изменение активного сопротивления электрической цепи. К ним относятся контактные, реостатные, угольные и проволочные датчики.

Самые простые из них — *контактные*. «Принцип их действия» — если позволено о них так пышно выразиться — основан на замыкании и размыкании контактов (рис. 2). Такой датчик сигнализирует

о крайних величинах перемещения и поэтому может быть применен, например, в автомате контроля размеров деталей. Предположим, что автомат должен сигнализировать только о таких деталях *Д*, размеры которых меньше $l-\Delta l$ или больше $l+\Delta l$, где Δl — допуск. В первом случае штифт *Ш* опустится и замкнет нижний контакт. В результате загорится неоновая лампочка *М* («меньше»); во втором случае деталь поднимет штифт до такого положения, при котором замкнется верхний контакт, и загорится лампочка *Б* («больше»). Если же размеры детали укладываются в норму, т. е. они больше $l-\Delta l$ и меньше $l+\Delta l$, то контакты останутся разомкнутыми, лампочки гореть не будут, и автомат определит такую деталь как «годную».

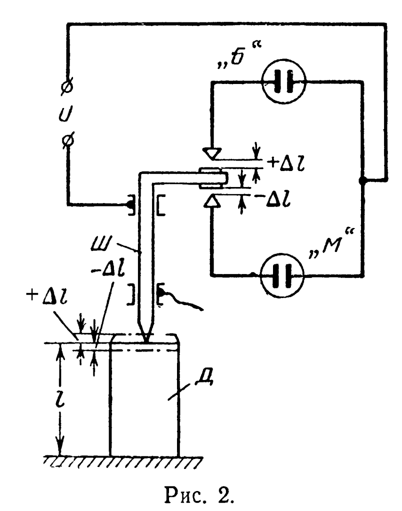


Рис. 2.

Несмотря на простоту контактного датчика, он может контролировать размеры с очень высокой точностью — до 1 *мк* (одного микрона) и точнее. Все дело в контактах и в том, какую цепь включают контакты. Если они включают обычные лампы накаливания, то точность работы датчика значительно снизится. Ведь электролампы накаливания потребляют большой ток. В момент размыкания и замыкания между контактами будет образовываться электродуга, и контакты быстро обгорят, т. е. изменят свои размеры. Понятно, что даже если все время регулировать такой датчик, большой точности все равно получить не удается. Поэтому-то вместо обычных ламп накаливания в схеме на рис. 2 указаны неоновые лампы, которые потребляют значительно меньший ток. Если же нужна особая точность работы датчика, то вместо ламп надо включить электроизмерительный прибор, потребляющий очень малый ток. Тогда о замыкании контактов можно будет судить по отклонению стрелки. Наконец, еще более точные результаты можно получить, включив датчик в сеточную цепь электронной лампы, ибо сеточная цепь электронной лампы потребляет ничтожный ток. Но о применении электронных ламп мы поговорим позднее.

Кстати, контактный датчик может быть и многопредельным. Для этого он должен иметь несколько контактов, которые замыкаются последовательно друг за другом (рис. 3). Если деталь имеет размер l_1, то замкнется контакт K_1. Если деталь имеет размер l_2, то замкнутся контакты K_1 и K_2, а если размер l_3, то замкнутся все три контакта. Соответственно сигнализирующий прибор на выходе датчика даст три различных показания.

На ином принципе работает *реостатный датчик* (рис. 4). По существу это переменное сопротивление, но особой конструкции. Такие датчики предназначены для контроля за положением задвижек, клапанов или для передачи на расстояние показаний неэлек-

трических измерительных приборов, например, манометров, измерителей уровня жидкости, показаний магнитных компасов и т. п.

Вот самый простой пример применения реостатного датчика. Предположите, что надо контролировать положение флюгера на метеостанции. Не очень-то приятно в любую погоду идти на площадку, взбираться на столб флюгера и на ветру, в дождь или на морозе записывать показания. А ведь можно в любой момент знать направление ветра, не выходя из здания метеостанции. Для этого ось флюгера надо соединить с движком реостатного датчика. Тогда при повороте флюгера движок датчика будет перемещаться по обмотке, и сопротивление датчика начнет изменяться в строгом соответствии с положением флюгера. Если такой датчик включить в схему, показанную на рис. 5, то по положению стрелки измерительного прибора можно с большой точностью узнать о положении флюгера.

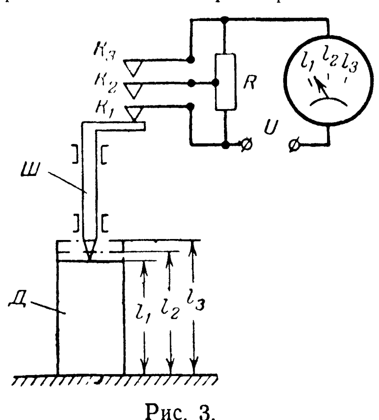
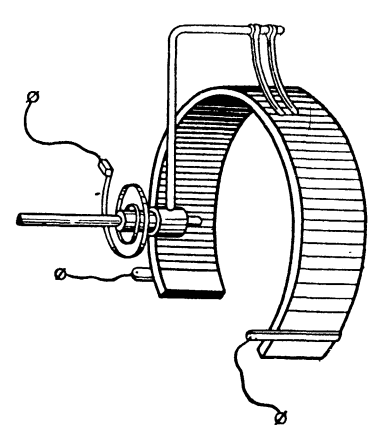


Рис. 3.

А теперь небольшое «теоретическое» дополнение. Чувствительность реостатного датчика, т. е. изменение напряжения $\Delta U_{вых}$ на выходе при изменении положения движка на Δa составляет 3—5 *в/мм*. Для потенциометрического датчика, показанного на рис. 6,*а*, чувствительность выражается отношением

$$S = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta a} = \frac{U_{вх}}{a_{макс}}.$$


Рис. 4.

Заметим, что если у потенциометрического датчика сделать отвод от середины обмотки (рис. 6,*б*), то такой датчик будет характеризовать не только величину перемещения движка, но и направление.

Для намотки датчиков применяют проволоку из материалов, указанных в табл. 1.

Конструктивное выполнение реостатного датчика зависит от того, насколько большим может быть давление щеток на обмотку. Если величина этого давления не играет существенной роли, например, при использовании датчика для контроля за положением две-

ри, какой-либо задвижки и т. п., то обмотку датчика изготовляют из манганиновой или константановой проволоки. Давление щеток на обмотку в этом случае должно быть порядка нескольких граммов. Но если реостатный датчик предназначен для передачи показаний какого-либо чувствительного измерительного прибора, например для контроля за положением магнитной стрелки компаса, то величиной трения щетки об обмотку уже нельзя пренебречь. Необходимо, чтобы трение было как можно меньше. В этом случае обмотку датчика изготовляют из очень тонкой (0,03 *мм*) платино-иридиевой проволоки, обеспечивающей хороший контакт при очень малом давлении щетки — не более десятков миллиграммов. Соответственно и конструкция датчика должна обеспечить перемещение щетки с очень незначительным трением.

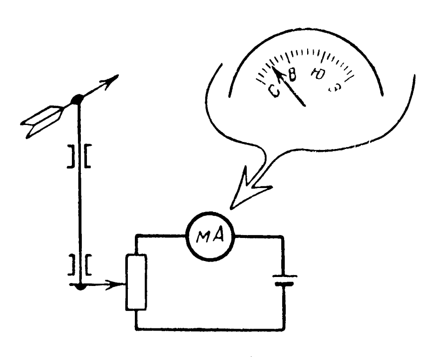


Рис. 5.

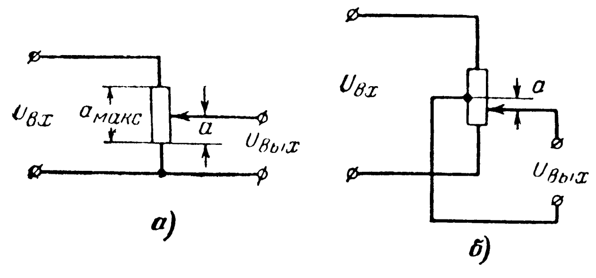


Рис. 6.

Угольные датчики работают на том же принципе, что и угольные микрофоны. Существуют два типа угольных датчиков: в виде столбиков и так называемые тензолиты, состоящие из порошка угля, графита или сажи, смешанного с бакелитовым или другим изолирующим лаком. Датчики в виде столбиков (рис. 7) применяют для измерения больших давлений, обычно более 20 *кг/см²*. Столбик состоит из 10—15 угольных шайб диаметром 5—10 *мм* и толщиной 1—2 *мм*. При сжатии столбика контактное сопротивление между шайбами уменьшается. Чтобы сопротивление столбика было стабильным и не изменялось от случайных встряхиваний и ударов, на столбик дают начальное давление порядка 20 *кг/см²*. Тогда при максимальном давлении в 60 *кг/см²* сопротивление столбика уменьшается на 20—30%.

Тензолиты применяют для измерения упругих деформаций деталей машин, т. е. таких изменений размеров и формы деталей,

Таблица 1

Материал проволоки	Удельное сопротивление, $ом \cdot мм^2/м$	Температурный коэффициент сопротивления, $1/°C \cdot 10^{-6}$	Максимальная температура, °C	Температурный коэффициент линейного расширения, $1/°C \cdot 10^{-6}$
Константан . .	0,44 — 0,52	5	500	15,2
Нихром . . .	1—1,2	130	1 050	14
Манганин . . .	0,42—2,08	29—40	300	23
Никелин . . .	0,42	—	200	—
Реотан	0,47	—	200	—
Фехраль . . .	1,38	15 (при 20°C) 50 (при 400°C)	1 200	17
Эдванс	0,488	—	500	—
Платина . . .	0,09—0,105	2 570—3 980	500	8,84
Золото	0,022	—	500	14,3
Никель	0,0703—0,079	6 000	—	13,1

которые, возникая под действием внешних нагрузок, исчезают после снятия нагрузки. Величины таких деформаций очень малы — доли миллиметра, поэтому датчики должны быть весьма чувствительны. Изготовляют тензолиты в виде стерженька диаметром около 1 *мм* с медными выводами. Стерженек наклеивают на полоску бумаги длиной 25 *мм* в том месте детали, деформацию в котором надо измерить. Стерженек воспринимает эту деформацию, чуть-чуть растягиваясь или сжимаясь. При этом изменяется плотность контакта между частицами угля в бакелитовом лаке и тем самым сопротивление датчика.

Рис. 7.

Чувствительность угольных датчиков выражают в относительных единицах η:

$$\eta = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l},$$

где ΔR — изменение сопротивления датчика при изменении длины датчика Δl;

$\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления датчика при относительном изменении длины $\Delta l/l$.

У тензолитовых датчиков η составляет 20 и более, что говорит об их высокой чувствительности.

Однако у угольных датчиков есть и значительный недостаток: большая зависимость их сопротивления от температуры. Поэтому угольные датчики нельзя применять для очень точных измерений.

Проволочные датчики чаще всего применяют для тех же целей, что и тензолиты: для измерения упругих деформаций, малых перемещений, вибраций. Такие проволочные датчики называются тензометрами. Работа их основана на явлении изменения сопротивления проволоки при ее растяжении или сжатии. Применяют

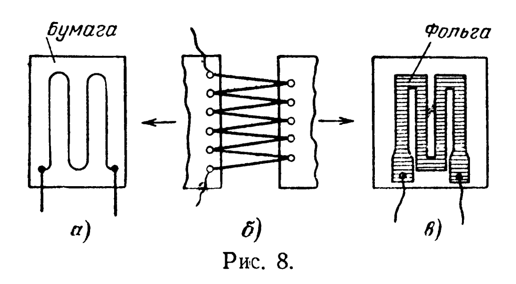


Рис. 8.

тензометры следующим образом. На испытываемую или контролируемую деталь наклеивают полоску бумаги (рис. 8) с вклеенной в нее специальным клеем (табл. 2) зигзагообразной проволокой

Таблица 2

Тип клея	Продолжительность высушивания при комнатной температуре, *ч*	Максимально допустимая температура, °С
БФ-2, БФ-4	48—72	180
Карбинольный	40	60
Нитроцеллюлозный (раствор 6—8 *г* целлулоида в 100 *см*³ ацетона) . .	10—12	60
Жаростойкий цемент „силикон"	—	300
Жидкий клей Тисенко	24	100
Густой клей Тисенко	24	100

диаметром не более 0,05 *мм* (табл. 3). К проволоке присоединены медные выводы. При сжатии или растяжении детали в направлении расположения проволоки сопротивление датчика изменяется во много раз значительнее, чем при деформации в перпендикулярном

Таблица 3

Материал проволоки	Относительная чувствительность* η	Удельное сопротивление при 20° С, *ом·мм²/м*	Температурный коэффициент при 18° С, $1/°C \cdot 10^{-6}$
Константан	1,9—2,2	0,47—0,51	От —40 до +21
Нихром	2	0,9—1,7	150—170
Железо-хром-алюминиевый сплав № 2	2,8—2,9	1,35—1,55	7—20

* Относительная чувствительность $\eta = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}$.

направлении. Это очень важное обстоятельство, так как достаточно расположить датчики под углом друг к другу — и можно выяснить не только величину деформации, но и направление действующих в детали усилий.

Иногда вместо проволоки в тензометрах применяют фольгу.

Обычно сопротивление проволочных датчиков составляет 100—200 *ом*, а относительная чувствительность $\eta = 2$. Как видите, по сравнению с угольными датчиками они малочувствительны, но зато тензометры стабильны, имеют малую зависимость сопротивления от температуры и очень просты в применении. Поэтому они широко применяются для измерений, при контроле и исследованиях.

Индуктивность и емкость тоже могут быть „органами чувств"

Индуктивные датчики применяют для измерения или контролирования различных механических перемещений, обычно в пределах 0,01—50 *мм*. Работа их основана на свойстве катушки индуктивности изменять свое сопротивление при введении в нее ферромагнитного сердечника или при изменении зазора в сердечнике, на котором помещена эта катушка. (Подробно о ферромагнитных сердечниках мы узнаем позднее, когда речь пойдет о магнитных усилителях. Сейчас же достаточно будет сказать, что ферромагнитными называются материалы, притягивающиеся обычным постоянным магнитом. Это, в частности, сталь, из которой изготовляют сердечники трансформаторов, реле и т. п.)

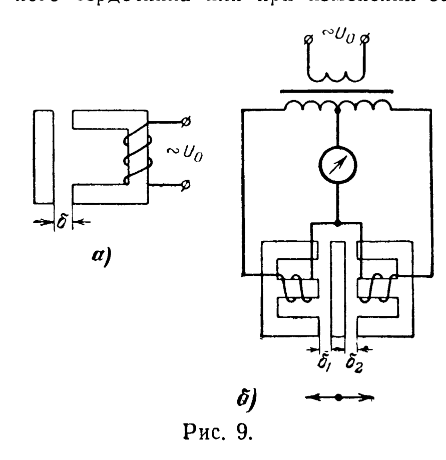


Рис. 9.

Для измерения или контроля очень малых перемещений (до 2 *мм*) применяют индуктивные датчики с изменяющейся величиной зазора (рис. 9,*а*) или, как их еще называют, с подвижным якорем. При изменении зазора δ сердечника индуктивное сопротивление катушки изменяется, что будет отмечено измерительным прибором. Датчик на рис. 9,*б* более чувствителен, так как при отклонении якоря от среднего положения происходит противоположное изменение индуктивного сопротивления обеих катушек. Например, если якорь переместиться вправо, то зазор δ_2 уменьшится, а зазор δ_1 увеличится. Поэтому индуктивное сопротивление правой катушки станет больше, а левой, наоборот, меньше.

Индуктивные датчики с перемещающимся сердечником (рис. 10,*а*) способны измерять большие перемещения — до 50 *мм*, а датчики с изменяющейся площадью зазора (рис. 10,*б*)—до 8 *мм*.

Для питания индуктивных датчиков используется переменный

ток промышленной (50 *гц*) или более высокой частоты — в несколько тысяч герц.

Как следует из принципа действия, индуктивные датчики способны реагировать не только на медленные механические перемещения, но и на быстрые знакопеременные. Однако «частотный» предел индуктивных датчиков обычно не простирается далее нескольких сотен герц (редко — тысяч герц) и определяется инерционностью подвижных элементов датчиков.

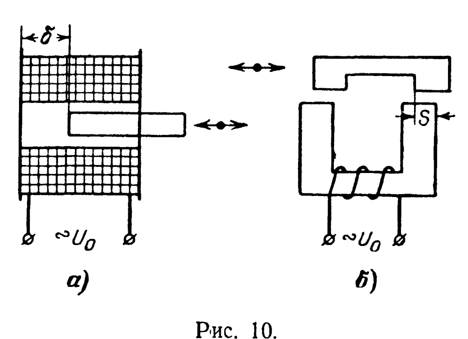


Рис. 10.

Емкостный датчик по существу представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется при изменении контролируемой неэлектрической величины. Как известно, емкость конденсатора зависит от площади пластин, расстояния между пластинами и диэлектрической проницаемости среды между обкладками. В соответствии с этим существуют три типа емкостных датчиков: с изменяемой площадью пластин, с изменяемым расстоянием между пластинами и с изменяемой диэлектрической проницаемостью среды между пластинами.

Схема емкостного датчика первого типа показана на рис. 11,*а*, а с изменяемым расстоянием между пластинами — на рис. 11,*б*. Первый датчик представляет собой конденсатор, в принципе подобный конденсаторам переменной емкости, которые применяются в радиотехнике для настройки высокочастотных контуров. При повороте подвижной пластины изменяется емкость датчика. Если включить такой датчик в колебательный контур генератора, то при изменении емкости датчика соответствующим образом изменится частота контура, причем чувствительность такого устройства будет чрезвычайно высокой, потому что на высокой частоте даже очень незначительное изменение емкости датчика вызовет заметное изменение частоты настойки контура. Такие датчики удобно использовать для контроля за незначительными угловыми перемещениями, для передачи показаний измерительных приборов и т. п.

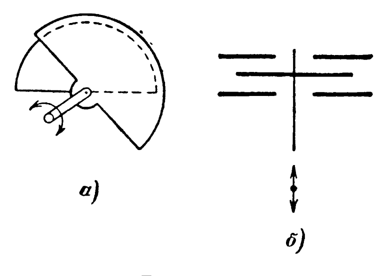


Рис. 11.

Датчики с изменяющимся расстоянием между пластинами предназначены для измерения вибраций или очень малых перемещений — до десятых долей микрона. Такой датчик обычно включают в соседние плечи мостовой схемы. При перемещении подвижной

пластины, например, вверх емкость между ней и верхней пластиной увеличивается, а между ней и нижней пластиной уменьшается. В соответствии с этим противоположные плечи мостовой схемы изменяются в обратном порядке, и чувствительность датчика как бы увеличивается вдвое.

Емкостные датчики с изменяющейся диэлектрической проницаемостью среды между пластинами обычно применяют для измерения уровня жидкости в котлах, сосудах, баках и т. п. Такой датчик представляет собой коаксиальный (рис. 12), т. е. трубчатый

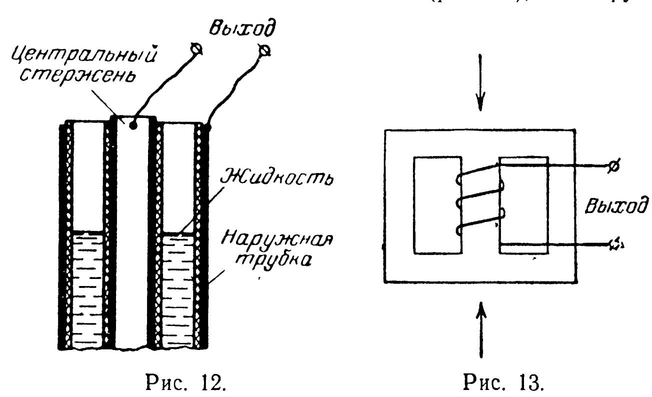


Рис. 12.   Рис. 13.

конденсатор. Одна из обкладок такого конденсатора — наружная трубка, другая — центральный стержень. В промежуток между стержнем и трубкой входит жидкость, уровень которой измеряется. Диэлектрическая проницаемость жидкости больше диэлектрической проницаемости воздуха, поэтому чем выше уровень жидкости в датчике, т. е. чем бо́льшая часть коаксиального конденсатора заполнена жидкостью, тем больше его емкость.

Для измерения давления и вибраций могут применяться также магнитоупругие и пьезоэлектрические датчики.

Магнитоупругие датчики основаны на явлении магнитоупругого эффекта: если намагниченный брусок ферромагнитного материала подвергнуть давлению, то его намагниченность изменится (вернее, изменится его магнитная проницаемость, о чем подробнее я расскажу позднее, когда буду рассказывать о магнитных усилителях).

Магнитоупругий датчик состоит из магнитопровода с помещенной на нем катушкой индуктивности (рис. 13). При сжатии магнитопровода его магнитная проницаемость изменяется, в результате чего изменяется полное электрическое сопротивление катушки (вспомните индуктивные датчики!).

Чувствительность магнитоупругого датчика зависит от способности сердечника изменять свою магнитную проницаемость под действием внешних сил. Наиболее чувствительны в этом отношении пермаллой и трансформаторное железо. Такие датчики могут применяться для исследования не только статических, т. е. постоянных или очень медленно изменяющихся давлений, но и быстро изменяющихся и знакопеременных нагрузок, вибраций и т. п.

Пьезоэлектрические датчики используют эффект появления зарядов на гранях кристалла при его механических деформациях. Проще говоря, если сжать вырезанный особым образом кристалл турмалина, кварца или сегнетовой соли, то на кристалле возникнет электрическое напряжение. Чем больше сжимающая сила, тем больше напряжения. Для увеличения чувствительности датчик составляют из нескольких пластин, включенных механически последовательно, а электрически — параллельно (рис. 14). В последнее время пьезоэлектрический элемент стали изготавливать из титаната бария.

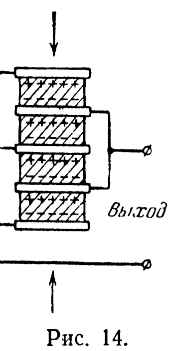


Рис. 14.

Малая величина заряда, возникающая на пьезокристалле, не позволяет применять пьезоэлектрические датчики для измерения постоянных или медленно изменяющихся нагрузок, так как эти заряды быстро утекают с кристалла через утечку изоляции. Зато такие датчики могут применяться для измерения быстропеременных нагрузок, например, для измерения и контроля давления газов в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, в стволах артиллерийских орудий и т. п.

Итак, мы рассказали о контактных, реостатных, индуктивных, емкостных, магнитоупругих и пьезоэлектрических датчиках, которые применяют для измерения и контроля в основном механических величин — давления, величины и скорости перемещения, вибраций и т. п. Для измерения и контроля температуры применяют другие датчики — на основе термосопротивлений и термопар.

Небезразличные к температуре

В термосопротивлениях используется свойство проводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Материалами для таких сопротивлений служат металлы с большим температурным коэффициентом сопротивления (табл. 4) или полупроводниковые материалы, т. е. такие материалы, сопротивление которых с увеличением температуры сильно возрастает.

Таблица 4

Материал	Температурный коэффициент, *ом/°C*	Удельное сопротивление, *ом·мм²/м*
Вольфрам	0,00421—0,00464	0,055—0,0612
Никель	0,00621—0,00634	0,118—0,138
Платина	0,00394—0,0056	0,098—0,106
Медь	0,00433	0,0156—0,017

Полупроводниковые термосопротивления называются термисторами. По сравнению с металлическими термосопротивлениями они обладают более высоким и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Термосопротивление в зависимости от условий применения может быть изготовлено в виде нити, катушки, спирали и т. п. Медные термосопротивления могут работать в диапазоне температур —50÷+150° С в сухой атмосфере и при отсутствии окисляющих газов. Диапазон температур никелевых термосопротивлений простирается до +250° С, однако они требуют хорошей изоляции от внешней среды. Термосопротивления из платины работают в диапазоне температур —190÷+500° С и не боятся воздействия внешней среды. Погрешность проволочных термосопротивлений не превышает 1—1,5%.

Термисторы, представляющие собой смеси окислов некоторых металлов, спрессованные и спеченные при высокой температуре, имеют малые габариты и поэтому особенно удобны для применения в датчиках. Но они имеют и серьезный недостаток — большой разброс отдельных экземпляров по сопротивлению (до 20%). Поэтому при замене вышедшего из строя термистора приходится регулировать схему или специально подбирать подходящий экземпляр термистора.

В зависимости от материала полупроводниковые термосопротивления делятся на медно-марганцевые ММТ и кобальто-марганцевые КМТ.

Медно-марганцевые термосопротивления ММТ-1, ММТ-6 и кобальто-марганцевые КМТ-1 предназначены для работы в сухих закрытых помещениях. Термосопротивления ММТ-4 и КМТ-4 герметизированы и поэтому могут быть использованы в условиях повышенной влажности и в жидкостях. Все эти термосопротивления предназначены для измерения и контроля температуры в диапазоне от —70 до +120 и +180° С.

Медно-марганцевые термосопротивления ММТ-8, ММТ-9 и кобальто-марганцевые КМТ-8 и КМТ-12 предназначены для температурной компенсации различных элементов электрической цепи, работающих в широком интервале температур. Дело в том, что при изменении температуры сопротивление обмоток катушек, проводов и тому подобных элементов электрических схем изменяется. При большой чувствительности схемы это может повлечь за собой разрегулировку схемы, изменение ее работы. Чтобы избежать этого, последовательно с элементом, сопротивление которого зависит от температуры, включают компенсирующее термосопротивление. Поскольку температурные коэффициенты у элемента цепи и термосопротивления имеют разные знаки, их можно подобрать так, что при изменении температуры суммарное сопротивление цепи не изменится.

Все, что рассказывалось о компенсирующих термосопротивлениях, правда, не имеет непосредственного отношения к датчикам, но это полезно иметь в виду при конструировании датчиков, так как обычно датчик — это измерительный прибор, и желательно его работу и работу связанной с ним схемы сделать нечувствительными к смене температур. Добавим, что при использовании компенсирующих термосопротивлений ММТ-8 и ММТ-9 сопротивление цепи, в которую они включены, можно поддерживать в интервале температур от —50 до +50° С с точностью около ±2%.

Кобальто-марганцевые термосопротивления УМТ-10 и КМТ-11 сконструированы для работы в схемах температурной сигнализации и теплового контроля. Термосопротивления КМТ-10 герметизиро-

ваны, и их можно применять при относительной влажности до 98%; термосопротивления КМТ-11 без защитного корпуса, и поэтому могут работать при относительной влажности не более 80%.

Данные полупроводниковых термосопротивлений приведены в табл. 5.

Таблица 5

Тип термосопротивления	Номинальное сопротивление при 20° С, *ком*	Температурный коэффициент сопротивления, % на 1° С	Диапазон рабочих температур, °С	Предельно допустимая мощность, *вт*
Термосопротивления для регулирования и измерения температуры				
ММТ-1	1—200	—2,4÷—3,4	+120	0,4
ММТ-4	1—200	—2,4÷—3,4	+120	0,4
ММТ-6	10—200	—2,4÷—3,4	+120	0,05
КМТ-1	20—1 000	—4,5÷—6	+180	0,8
КМТ-4	10—1 000	—4,5÷—6	+120	0,9
Термосопротивления для теплового контроля				
КМТ-10, КМТ-11	100—3 000	—4,5÷—6	+120	0,25
Термосопротивления для термокомпенсации				
ММТ-8	0,001—1	—2,4÷—3,4	—40÷+60	—
ММТ-9	0,01 —5	—2,4÷—3,4	—60÷+120	—
КМТ-8	0,1 —10	—4,2÷—5	—40÷+60	—
КМТ-12	0,1 —10	—4,2÷—5	—40÷+120	—

Когда термосопротивления используют в качестве датчика, они могут работать в двух режимах: 1) температура термосопротивления определяется температурой окружающей среды; 2) термосопротивление нагревается проходящим по нему током, а температура термосопротивления определяется изменяющимися условиями охлаждения, что связано с температурой окружающей среды.

В первом случае термосопротивление применяется в качестве датчика температуры или, как еще говорят, термометра сопротивления. Ток, протекающий по термосопротивлению, должен быть настолько малым, чтобы он не вызывал ощутимого нагрева термосопротивления. В качестве таких термометров сопротивления могут применяться как полупроводниковые термосопротивления, так и металлические из проволоки диаметром порядка 0,1 *мм*, намотанные на слюдяной, фарфоровой или кварцевый каркас. Сопротивление датчика при комнатной температуре обычно около 50—100 *ом*. Полупроводниковый датчик обладает меньшей стабильностью, но зато он значительно более чувствителен, чем металлический, и позволяет обнаружить отклонения температуры на сотые и тысячные доли градуса.

Во втором случае термосопротивления обычно используются в качестве датчиков для измерения неэлектрических величин, тем

или иным способом изменяющих отвод тепла от термосопротивления. Например, таким способом может быть изготовлен анемометр — устройство, измеряющее и контролирующее скорость потока газа. Термоанемометр (рис. 15) представляет собой тонкую платиновую нить, припаянную к стойкам и нагреваемую током. Исследуемый газовый поток обдувает нить, поэтому ее температура, а следовательно, и сопротивление зависят от скорости потока газа. Таким образом, в данном случае происходит преобразование скорости потока в электрическое сопротивление датчика. Таких примеров преобразования при помощи термосопротивлений можно привести очень много. Почти любая величина может влиять на теплоотдачу, все дело в остроумии конструктора.

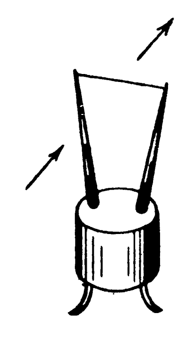


Рис. 15.

Датчики, о которых мы говорили до сих пор, являются параметрическими. Рассмотрим теперь один из генераторных датчиков — термоэлектрический.

Работа *термоэлектрических датчиков*, или, как их еще называют, термопар, основана на термоэлектрическом эффекте. Если соединить два разнообразных проводника и нагреть место соединения, то на свободных холодных концах проводников появится э. д. с. Чем больше разность температур между «холодными» и «горячими» концами, тем больше э. д. с.

Для измерения температур до 1 000° С применяют термопары из металлов; для измерения температур до 1 600° С термопары изготавливают из благородных металлов, а для измерения еще бóльших температур применяют термопары из специальных жароупорных материалов, например, уголь — карбид кремния (до 1 800° С), вольфрам—молибден (до 2 100° С). Данные некоторых термопар приведены в табл. 6.

Таблица 6

Тип термопары	Материал	Пределы измерения, °С
ТПП-11	Платинородий—платина	До 1 300
ТХА-VII	Хромель—алюмель	До 800
ТХК-XIII	Хромель—копель	До 600
Т-3	Хромель—копель	0—300
Т-180	Медь константановая	—200+50

При использовании термопары в качестве датчика ее надо предварительно отградуировать, т. е. определить зависимость э. д. с. от температуры рабочего конца при определенной температуре «холодного» конца, обычно равной +20° С. К последнему условию надо отнестись очень строго, так как если при работе датчика температура «холодного» конца не соответствует той, при которой производилась градуировка, то возникает погрешность в показаниях

датчика. Поэтому температура этого конца должна поддерживаться строго постоянной Однако это возможно далеко не всегда, ибо для этого нужен термостат, и часто проще в устройстве вводить автоматическую поправку на изменение температуры «холодного» конца термопары. Для этого в непосредственной близости к «холодному» концу устанавливают термосопротивление, включенное в отдельную корректирующую цепь. При изменении температуры «холодного» конца термопары и появлении связанной с этим ошибки в показаниях термоэлектрического датчика корректирующая цепь благодаря реагированию термосопротивления на изменение температуры «холодного» конца автоматически подправляет показания датчика (например, изменением чувствительности схемы, в которую включен термоэлектрический датчик).

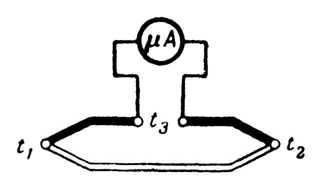


Рис. 16.

Часто в автоматике термопары применяют для сравнения температур в двух точках. Такие термопары называют дифференциальными. Оба конца такой термопары (рис. 16) являются рабочими, и термо-э. д. с. отличается от нуля, когда температуры концов неодинаковы, причем полярность зависит от того, у какого конца температура выше.

Конструктивно термопары весьма разнообразны, начиная от термопар больших, предназначенных для установки в доменных печах, и кончая миниатюрными вакуумными термопарами, т. е. такими, у которых рабочий конец помещен в вакуум.

Надо подчеркнуть, что все термопары в той или иной степени обладают тепловой инерцией. Это значит, что они не сразу реагируют на изменение температуры. Вызвано такое запаздывание тем, что рабочему концу требуется некоторое время (обычно — доли секунды), чтобы нагреться или охладиться до температуры окружающей среды.

Электронный глаз

Так иногда называют фотоэлектрические датчики. Они предназначены для измерения и контроля световой энергии.

Фотоэлектрический датчик (или фотоэлемент) — это устройство, чувствительное к свету, причем фотоэлемент можно сделать таким, что он будет реагировать не на весь спектр видимого света, а только на лучи определенной частоты, в том числе на лучи, которые человеческий глаз не видит. Заметим, что чувствительность фотоэлемента к различным частотам светового потока носит название спектральной чувствительности.

Фотоэлектрические датчики реагируют — в прямом смысле этого слова — только на изменение интенсивности светового потока. Но косвенным образом они могут применяться для измерения и регулирования температуры, измерения механических перемещений, скорости вращения, уровня, использоваться для сортировки и отбраковки деталей и т. п. Поясним это примерами.

Сортировка и отбраковка деталей по чистоте обработки при помощи фотоэлемента может быть произведена по следующей схе-

ме. Луч света, сфокусированный оптической системой, падает на поверхность контролируемой детали. Если эта поверхность хорошо обработана и, следовательно, ровная, то от нее отразится значительно большее количество света, нежели когда поверхность детали шероховатая. Отраженный свет падает на фотоэлемент, ток которого тем больше, чем больше интенсивность отраженного от исследуемой поверхности света. После усиления фототок вызывает соответствующее отклонение стрелки гальванометра, на шкале которого нанесены два предела: «брак» и «годная». Кроме того, фототок может управлять работой реле, которое будет включать механизм, сталкивающий с конвейера бракованные детали.

Таких примеров, и весьма остроумных, косвенного применения фотоэлектрических датчиков очень много.

Фотоэлементы бывают трех типов: фотоэлементы с запирающим слоем (вентильные), фотоэлементы с внешним фотоэффектом (вакуумные или газонаполненные) и фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления).

Фотоэлемент с запирающим слоем состоит из металлической подложки, тонкого слоя полупроводника и металлического полупрозрачного электрода. Между полупроводником и одним из электродов образован запорный слой, через который электроды не могут пройти. (Подробнее о полупроводниках, запорных слоях и т. п. будет рассказано позднее, когда мы будем говорить о полупроводниковых усилителях.) Поэтому в темноте или при малой освещенности ток в цепи фотоэлемента очень малый — так называемый теневой ток, составляющий десятые или сотые доли микроампера. Когда же на фотоэлемент падает световой поток, электромагнитные кванты света выбивают из полупроводника электроны, которые благодаря полученной энергии проходят запорный слой и заряжают электрод отрицательно. Сам же полупроводник и второй металлический электрод заряжаются положительно. Таким образом, вентильный фотоэлемент на свету превращается в генератор электрической энергии.

Таблица 7

Тип фотоэлемента	Чувствительность (интегральная), *мка/лм*	Максимум спектральной характеристики, *мк*	Рабочая площадь, *см²*
К-5	500	0,55	5
К-10	500	0,55	10
К-20	500	0,55	20
Серно-таллиевый	10 000	0,95	2
ФЭСС-И-2	6 000—7 000	0,85	2
ФЭСС-И-3	6 000—7 000	0,85	3
ФЭСС-И-5	6 000—7 000	0,85	5
ФЭСС-И-10	6 000—7 000	0,85	10

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом (табл. 7) используют способность света выбивать электроны с поверхности металла (рис. 17). Такой фотоэлемент по форме напоминает электронную лампу. Электрод, испускающий электроны под действием света, помещен внутри колбы, в вакууме или в атмосфере инертного газа.

Выбитые электроны под действием электрического поля устремляются ко второму электроду, создавая фототок. Чем интенсивнее световой поток, тем сильнее фототок.

Фотосопротивления или фотоэлементы с использованием внутреннего фотоэффекта (табл. 8) основаны на свойстве полупроводников изменять свою проводимость под действием света. Чем интенсивнее световой поток, тем меньше сопротивление фотоэлемента, т. е. величина светового потока преобразуется в величину электрического сопротивления.

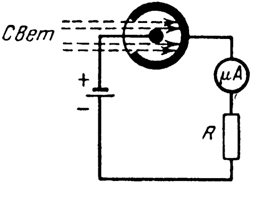


Рис. 17.

Чувствительность фотосопротивлений в тысячи раз превышает чувствительность вакуумных фотоэлементов и обеспечивает непосредственную работу на электромагнитное реле или электроизмерительный прибор без применения усилителя. Кроме того, они не требуют соблюдения полярности включения и могут работать в цепи переменного тока. Однако фотосопротивления обладают существенной инерционностью, т. е. они не могут уследить за быстрым изменением интенсивности светового потока (их диапазон частот изменения светового сигнала ограничивается для фотосопротивлений типа ФС-К десятками герц и для фотосопротивлений типа ФС-А единицами килогерц).

Таблица 8

Тип фотоэлемента	Рабочее напряжение, *в*	Чувствительность, *мка/лм*	Максимум спектральной характеристики, *мк*
СЦВ-3	240	80	0,32—0,45
СЦВ-4	240	80	0,32—0,45
СЦВ-51	240	80	0,32—0,45
ЦВ-1	240	20	0,75—0,95
ЦВ-3	240	20	0,75—0,95
ЦВ-4	240	20	0,75—0,95
ЦГ-1	240	75	0,7—0,95
ЦГ-3	240	100	0,7—0,95
ЦГ-4	240	100	0,7—0,95
ФЭУ-1	220	500	0,3—0,45
ФЭУ-2	220	500	0,3—0,45
ФЭУ-17	800	$(0,5 \div 5)\cdot 10^6$	0,3—0,45
ФЭУ-18	800	$(0,5 \div 5)\cdot 10^6$	0,3—0,45
ФЭУ-19	1 250	$(0,5 \div 5)\cdot 10^6$	0,3—0,45

Высокой чувствительностью и малой инерционностью обладают фотодиоды и фототранзисторы — германиевые полупроводниковые устройства, появившиеся в последнее время. Фотодиоды могут работать в так называемом режиме А, когда они подобны вентильному фотоэлементу и не требует внешнего источника напряжения. При работе в режиме Б через фотодиод в темноте проходит тем-

новой ток, величина которого зависит от приложенного внешнего напряжения. При освещении фотодиода ток через него возрастает пропорционально освещенности. В режиме Б фотодиод может работать со световым потоком, интенсивность которого изменяется с частотой до 100 *кгц*. Спектральная же характеристика, т. е. чувствительность фотодиода к различным частотам спектра, имеет максимум около длины световой волны 1,5 *мк* и доходит до ультрафиолетовой области.

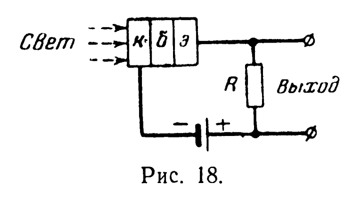


Рис. 18.

Такую же спектральную характеристику имеют и фототранзисторы, схема включения которых показана на рис. 18.

Недостатком фотодиодов и фототранзисторов, как впрочем и всех полупроводниковых приборов, является зависимость их параметров от температуры. Основные данные этих приборов приведены в табл. 9.

Я рассказал уже о многих датчиках. С их помощью можно преобразовывать в электрический ток, напряжение или сопротивление почти все физические величины. Однако упомянуты далеко не все типы и виды датчиков, применяемых в современной автоматике. Стоило бы упомянуть о радиационных датчиках, реагирующих на

Таблица 9

Параметры	Типы фотодиодов и фототранзисторов			
	ФД-1	ФД-2	ФД-3	ФТГ-1
Рабочее напряжение, *в*	15	30	15	10—15
Темновой ток при рабочем напряжении, *мка*	30	25	9—10	100—1 000
Ток при освещении, *мка*	800	—	250	1 000—20 000
Наибольшее рабочее напряжение, *в*	20	50	20	20
Наибольшее значение интегральной чувствительности, *ма/лм*	20	20/I 19/II 14/III	15—20	2—20 10^3
Наибольшая рассеиваемая мощность, *мвт*	15	15	—	50
Сопротивление нагрузки, *ком*	7,5	300	—	0,5

интенсивность α-, β- или γ-лучей, рассказать о ламповых датчиках, которые применяют для измерения механических перемещений. Эти датчики по существу представляют собой электронную лампу, электроды которой под действием внешних механических воздействий смещаются относительно других, неподвижных, электродов. В результате изменяется ток через лампу, что позволяет судить о величине механических перемещений. В химии применяются электролитические датчики, работа которых основана на свойстве электролитов (водных растворов кислот, солей и оснований) изменять

свою удельную проводимость в зависимости от концентрации раствора.

Словом, о датчиках можно рассказать еще очень много. Датчикам посвящено много толстых томов, сведениями о них заполнены справочники и руководства. В них вы найдете мельчайшие подробности. А цель этой книги другая — заинтересовать вас автоматикой.

Пойдемте же дальше!

УСИЛИТЕЛИ

Необыкновенная лампа

Вы, наверно, заметили, что сигналы многих датчиков очень слабые. Такие датчики самостоятельно не в состоянии управлять даже весьма чувствительными реле, не говоря уже об электромоторах, тяговых электромагнитах и прочих исполнительных устройствах автоматики. Поэтому усиление сигналов датчиков — часто встречающаяся задача.

Однако не только датчики нуждаются в усилителях. В автоматике и особенно телемеханике приходится иметь дело с усилением очень слабых сигналов управления, измерения, контроля и обратной связи. В любом сколько-нибудь сложном автоматическом или телемеханическом устройстве обязательно присутствуют усилители. Это одни из основных элементов, и нам придется уделить им достаточно внимания.

В настоящее время усилители, применяемые в автоматике, телемеханике и вычислительной технике, весьма разнообразны. Они работают на электронных лампах, магнитных сердечниках и полупроводниковых приборах. Они могут быть очень мощными, как, например, магнитные усилители, способные управлять огромными электродвигателями, и очень маленькими, меньше спичечной коробки, предназначенными для управления чувствительными реле и электронными устройствами. Но лучше говорить не о размерах усилителей или их мощности, и не об электронных устройствах, которые в них работают, а подразделить усилители в зависимости от диапазона частот, на которых они работают.

На выходе многих датчиков присутствует постоянное напряжение, значение которого отображает физическую величину, воздействующую на датчик. При изменении этого внешнего воздействия изменяется величина напряжения на выходе датчика.

В данном случае приходится иметь дело с усилением постоянного или медленно изменяющегося напряжения, т. е. переменного напряжения очень низкой частоты. Это осуществляют при помощи усилителей постоянного тока.

Очень часто встречается необходимость в усилении низкой или так называемой звуковой частоты примерно от 10—20 *гц* до 15—25 *кгц*. Для усиления таких частот имеется свой класс усилителей, похожих на усилители звуковой частоты в радиоприемниках и телевизорах.

Большое значение в автоматике, телемеханике и вычислительной технике имеет усиление импульсов напряжения или тока. Надо

сказать, что это, пожалуй, наиболее сложная задача, так как для усиления импульсов требуется очень широкая полоса частот. Проще говоря, импульсный усилитель должен хорошо усиливать и очень низкие (порядка десятков герц) и очень высокие частоты (порядка миллионов герц). Поэтому такие усилители часто называют широкополосными.

Наконец, как я уже говорил, для управления исполнительными механизмами нужны мощные усилители постоянного тока и низких частот. Такие обязанности обычно выполняют магнитные усилители.

Я надеюсь, все видели и знают, как работает обычная электронная лампа. А если кто-нибудь забыл, я вкратце напомню.

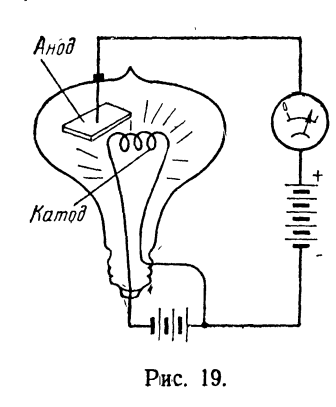


Рис. 19.

Радиолампа начала свое существование со случайного открытия известного американского изобретателя Т. Эдисона, который в то время (1883 г.) работал над усовершенствованием электрических ламп накаливания. Он обнаружил загадочное явление: если в колбу лампы, из которой выкачан воздух, рядом с нитью накаливания поместить металлическую пластинку, соединить ее с положительным полюсом батареи и присоединить отрицательный полюс батареи к нити накаливания, то между накаленной нитью и пластинкой начнет проходить электрический ток (рис. 19).

В то время это было необъяснимо. Ведь между нитью и пластинкой не было никакого проводника электричества. Даже воздух был удален из колбы! Непонятно было и то, что если поменять полярность включения батареи, прохождение тока прекращалось. Объяснение этому странному явлению было дано позднее, когда была разработана электронная теория электричества. Все оказалось очень просто: накаленная нить лампы испускала электроны — это явление получило название электронной эмиссии, — которые притягивались положительно заряженной пластинкой. Эти-то электроны и создавали электрический ток. Естественно, что когда пластинку соединяли с отрицательным полюсом батареи, то она, будучи заряжена отрицательно, отталкивала электроны, и прохождение тока прекращалось.

Через двадцать лет радиотехникам для детектирования потребовался прибор с односторонней проводимостью электрического тока. Тогда вспомнили об открытии Эдисона. Лампа с двумя электродами получила название диода. Накаливающаяся нить стала называться катодом, а пластинка — анодом. Затем между катодом и анодом ввели металлическую сетку. Это, казалось бы, несложное усовершенствование придало электронной лампе замечательные свойства: из скромного детектора она превратилась в усилитель и генератор электрических колебаний.

Появление электронной лампы окрылило тогда еще очень молодую радиотехнику, и она сделала гигантский скачок вперед. Однако вначале электронная лампа была очень несовершенна и гро-

мозддка. Прошло много лет, потребовались усилия многих ученых и инженеров, прежде чем радиолампа стала достаточно совершенной. Электронные лампы 20-х годов по виду не так уж отличались от обычных электрических осветительных ламп. Да и светили они почти так же, как осветительные лампы. Но шли годы, и электронная лампа преображалась. Появились лампы, предназначенные для модуляции, генерирования, усиления высоких частот, выпрямления переменного тока и пр. Радиотехника стала осваивать очень короткие волны — так называемый диапазон сверхвысоких частот, и это потребовало создания специальных радиоламп, и лампы видоизменились применительно к новым требованиям. С помощью электронных ламп оказалось возможным создать современное радиовещание, телевидение, радиолокацию, звукозапись, радионавигацию,

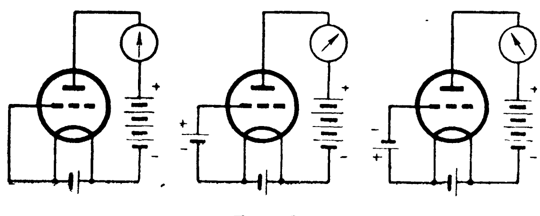


Рис. 20.

электронные вычислительные машины, радиоастрономию. Электронные лампы позволили управлять процессами в атомном ядре и полетами космических ракет. Без электронных ламп сейчас не обходится ни одна наука, ни одна область техники!

Однако, как же усиливает радиолампа?

Когда катод лампы накален, он как бы окутан облаком вылетевших из него электронов. Под влиянием электрического поля положительно заряженного анода электроны начинают двигаться к аноду, создавая анодный ток лампы. Этот ток тем больше, чем больше положительное напряжение на аноде, т. е. чем сильнее его электрическое поле. Если между катодом и анодом поместить металлическую сетку (рис. 20), но не подавать на нее электрического напряжения, то картина не изменится. Электроны будут свободно проходить через отверстия сетки и устремляться к аноду, так как отверстия даже самой мелкой сетки колоссально велики по сравнению с размерами электронов. Однако достаточно подать на сетку электрический заряд, как вокруг нее образуется электрическое поле, и сетка начнет оказывать влияние на прохождение электронов к аноду. Если сетка будет заряжена положительно по отношению к катоду, то она будет помогать аноду притягивать электроны, увеличивая тем самым анодный ток лампы. Если же сетка по отношению к катоду заряжена отрицательно, то она будет отталкивать электроны, препятствуя прохождению их через ее отверстия, и тем самым уменьшать анодный ток лампы.

Таким образом, сетка управляет анодным током лампы, и замечательно то, что очень незначительное изменение напряжения на ней значительно изменяет анодный ток лампы. Вот это свойство и позволяет электронной лампе усиливать электрические колеба-

ния: достаточно приложить между сеткой и катодом небольшое напряжение, например с амплитудой 1 *в*, как это приведет к значительным колебаниям анодного тока лампы. Этот ток, проходя через нагрузку — сопротивление, включенное между анодом лампы и источником анодного питания, создаст на этой нагрузке падение напряжения. А так как анодный ток лампы изменяется в такт с изменениями напряжения на сетке, то величина падения напряжения на нагрузке также будет изменяться в такт с изменением напряжения на сетке, причем амплитуда этого изменения напряжения уже составляет десятки вольт. Усиление налицо!

Так работает простейшая электронная лампа. Заметьте, простейшая!

Взгляните на принципиальную схему любого лампового радиоприемника. В овале, изображающем на схеме колбу электронной лампы, вы увидите обозначения многих деталей, о которых я не упомянул: отдельную нить накала, электрически изолированную от катода, а кроме управляющей сетки, о которой мы уже говорили, еще несколько сеток (рис. 21). И надо признаться, что эти «лишние» детали очень нужны.

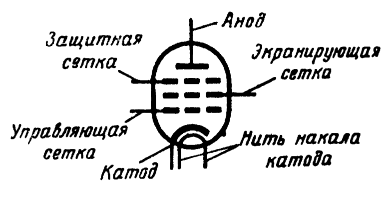


Рис. 21.

Вспомните, что переменное напряжение, поданное на управляющую сетку лампы, передается в анодную цепь с усилением. Но между анодом и управляющей сеткой существует емкостная связь. Из-за этой связи изменения напряжения из анодной цепи передаются обратно в цепь управляющей сетки, и тут возможны два случая. Во-первых, напряжение обратной связи может увеличивать общее напряжение на управляющей сетке, если положительные и отрицательные полупериоды напряжения обратной связи и напряжения, поступающего на управляющую сетку, совпадают во времени. Увеличение амплитуды напряжения на управляющей сетке вызовет увеличение амплитуды напряжения на аноде, а это в свою очередь приведет к еще большему напряжению обратной связи, и, следовательно, напряжение на управляющей сетке еще больше возрастет, и т. д. Такая обратная связь называется «положительной». Если она достаточно велика, то прогрессирующее увеличение амплитуды напряжения на управляющей сетке и аноде лампы приведет к паразитной генерации схемы усилителя. Но может случиться и так, что напряжение обратной связи будет уменьшать общее напряжение на управляющей сетке. Такая обратная связь называется «отрицательной», ибо она вызывает уменьшение усиления лампы. Поэтому наличие обратной связи — особенно значительной — через емкость анод — сетка нежелательно. Конечно, обратная связь возникает в электронных схемах не только за счет емкости между анодом и сеткой лампы. В возникновении обратной связи значительную роль играют и емкости между цепями этих электродов, между деталями, проводами и т. п. Однако при продуманном расположении деталей и проводов, т. е. при хорошем монтаже, эти емкости очень незначительны. А вот уменьшить емкость между анодом и управляющей сеткой в лампе, казалось бы, можно только уменьшением

размеров анода и сетки и удалением их друг от друга Но это приводит к резкому ухудшению усилительных свойств лампы, падению ее мощности и неспособности работать на очень высокой частоте.

Поэтому пришлось искать другие способы уменьшения емкости между анодом и управляющей сеткой лампы. Оказалось, что можно значительно уменьшить эту емкость, если ввести между электродами экран в виде сетки, на которую подано положительное напряжение, но меньшее по величине, чем анодное. Эта новая сетка не мешает пролету электронов к аноду, так как имеет положительный потенциал. Наоборот, она даже помогает в этом, «подтягивая» электроны. Называется она экранирующей сеткой, а лампа с двумя сетками — тетродом.

Третья сетка, которая имеется у электронных ламп, называемых пентодом, защищает лампу от так называемого динатронного эффекта: электроны, ударяющиеся в анод с большой скоростью, выбивают из него вторичные электроны, которые, отскакивая от анода, притягиваются положительно заряженной экранирующей сеткой и тем самым создают обратный электронный поток, ухудшающий работу лампы. Чтобы устранить это неприятное явление, пришлось ввести между анодом и положительно заряженной экранирующей сеткой еще одну сетку, но заряженную отрицательно по отношению к аноду. Эта сетка отталкивает вылетающие из анода электроны обратно к аноду и носит название защитной.

В большинстве случаев автоматические устройства, радиоприемники и другие электронные устройства питают от обычной сети переменного тока. Питание накала ламп производится этим же током, напряжение которого понижено при помощи трансформатора до нескольких вольт. Но так как ток переменный, то в соответствии с его изменениями изменяется и температура накала нити. Если нить будет служить и катодом, то одновременно с изменением температуры нити будет изменяться и число вылетающих из нее электронов. Поэтому анодный ток лампы будет также изменяться с частотой переменного тока. Чтобы избежать этого, нить накала изолируют от катода. Нить только подогревает массивный катод, и благодаря его значительной тепловой инерции изменение температуры нити не сказывается на количестве вылетающих электронов.

Вот, пожалуй, и все «напоминание» о том, как работает электронная лампа. Правда, нам не удалось сделать это напоминание коротеньким, но не огорчайтесь: придется еще столько раз встречаться с электронной лампой, что вы не пожалеете о близком с ней знакомстве. А теперь поговорим об усилителях низкой частоты.

О „начале“ и „конце“ усилителя и о режиме его работы

Начнем с того, что усилители могут быть однокаскадные и многокаскадные. Что такое каскад? Каскад — это этап усиления. Естественно, что многоэтапные (многокаскадные) усилители могут обеспечить значительно большее усиление, чем однокаскадные. Однако при выборе схемы усилителя надо учитывать не только коэффициент усиления, который может обеспечить та или иная схема

(коэффициент усиления показывает, во сколько раз выходная мощность или выходное напряжение превышает входную мощность или напряжение). Все дело в том, какая мощность требуется на выходе усилителя и от какого входного напряжения должен работать усилитель. Если выходная мощность должна быть значительной — порядка ватта и более, то на выходе усилителя должна стоять мощная лампа или даже несколько ламп. На сетку таких ламп надо подавть довольно значительное напряжение—несколько вольт. Если датчик или какое-либо другое устройство, сигналы которого подлежат усилению, дают эти необходимые для управления выходной лампой несколько вольт переменного напряжения, то все в порядке: сетку выходной лампы можно присоединить непосредственно к выходу датчика. Когда же амплитуда сигналов настолько мала, что они не могут управлять мощной выходной лампой, то эти сигналы приходится усиливать в так называемом каскаде (или каскадах) предварительного усиления.

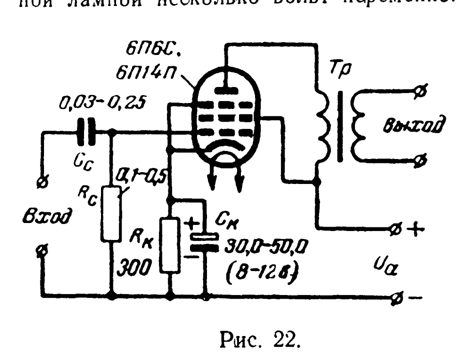


Рис. 22.

Схема простого оконечного каскада показана на рис. 22. Как видно из схемы, на выходе стоит трансформатор, первичная обмотка которого включена в анодную цепь лампы и служит ее нагрузкой, а вторичная обмотка является выходом усилителя. Зачем нужен этот трансформатор, почему обмотку реле нельзя включить прямо в анодную цепь выходной лампы?

Впрочем, можно обмотку реле и включить в анодную цепь лампы, без трансформатора. Но это возможно лишь при определенных условиях. Дело в том, что лампа работает наилучшим образом при правильно выбранной величине анодной нагрузки по переменному току. Иными словами, сопротивление, включенное в анодную цепь лампы, должно быть определенной величины, и только в этом случае лампа отдаст в нагрузку наибольшую мощность без искажений. Обычно величина сопротивления нагрузки составляет несколько тысяч ом. Вот и получается, что если обмотка реле имеет подходящую величину сопротивления переменному току, то ее можно включить непосредственно в анодную цепь выходной лампы усилителя. Если же сопротивление обмотки реле (или какого-либо другого устройства) очень мало или, наоборот, очень велико по сравнению с необходимой для лампы величиной анодной нагрузки, то реле подключают к выходу усилителя через согласующий трансформатор. Расчет такого трансформатора можно найти в справочниках по радиотехнике. Замечу, что если сопротивление устройства, включаемого на выход усилителя, порядка нескольких ом или десятков ом (именно такое сопротивление имеет звуковая катушка динамического громкоговорителя), то можно применить обычный выходной трансформатор, какой применяется в усилителях низкой частоты радиовещательных приемников.

Каскад предварительного усиления, как я уже говорил, должен усилить входной сигнал до такого значения, чтобы он мог «раскачать» мощную лампу выходного каскада. Связь каскада предварительного усиления с выходным может осуществляться через реостатно-емкостную цепь (каскад с такой связью называют

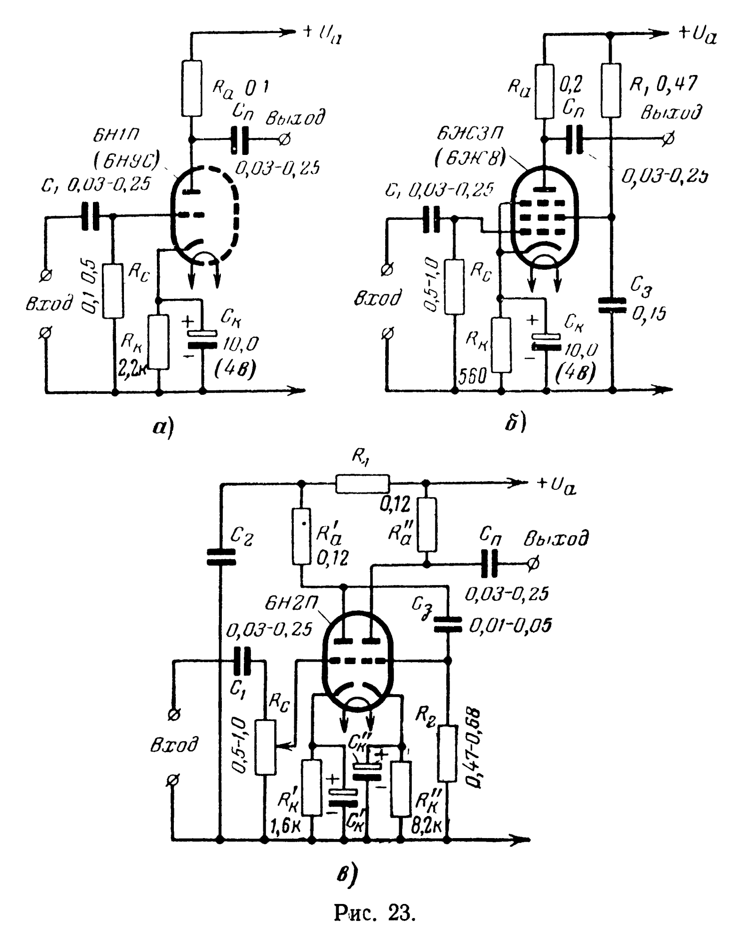


Рис. 23.

каскадом на сопротивлениях) или при помощи переходного трансформатора. Последний вид связи чаще всего применяется при двухтактном выходном каскаде, когда в выходном каскаде работают две лампы.

Схемы каскадов предварительного усиления на сопротивлениях приведены на рис. 23. Надо сказать, что в оконечных каскадах

чаще всего работают пентоды или лучевые тетроды (тетроды особой конструкции). В каскадах же предварительного усиления могут работать как триоды (рис. 23,*а*), так и пентоды (рис. 23,*б*). Эти каскады работают следующим образом. На управляющую сетку лампы поступает сигнал низкой частоты, подлежащий усилению. Сигнал усиливается и далее с анода лампы каскада предварительного усиления через переходный конденсатор $C_п$ поступает на управляющую сетку лампы выходного каскада. Если один каскад предварительного усиления не в состоянии обеспечить нужное усиление (например, входной сигнал очень мал), то ставят два кас-

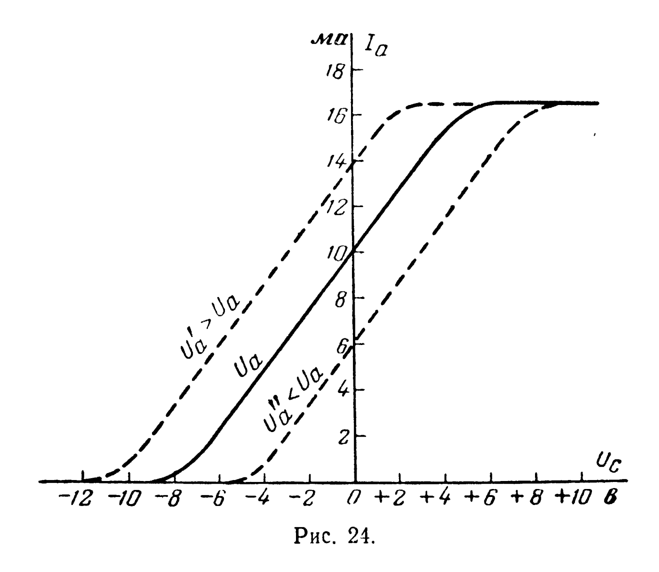


Рис. 24.

када предварительного усиления. На рис. 23,*в* показана схема двухкаскадного предварительного усилителя на двойном триоде.

Но на самом деле не все так просто. И о некоторых тонкостях мы сейчас поговорим.

Вначале о режиме, в котором должна работать электронная лампа (кстати, все сказанное будет относиться и к работе выходной лампы). Обратите внимание, что катод лампы в схеме на рис. 23 соединен с землей через сопротивление $R_к$, параллельно которому включен шунтирующий конденсатор $C_к$. Это так называемая цепь автоматического смещения. Что это значит, о каком смещении идет речь?

Работу электронной лампы принято изображать графически (рис. 24). Этот график носит название сеточной характеристики и показывает зависимость величины анодного тока лампы от напряжения на управляющей сетке при постоянном напряжении на аноде. Как видно из графика, величина напряжения на сетке U_c (в вольтах) отложена по горизонтальной оси, причем отрицательные напряжения — влево от нуля, а положительные — вправо. Ве-

личина анодного тока $I_а$ (в миллиамперах) отложена по вертикальной оси вверх от нуля — анодный ток всегда положителен! Теперь запомните, что при увеличении напряжения на аноде $U_а$ характеристика сдвигается влево, а при уменьшении — вправо (на рисунке эти характеристики показаны пунктиром). Если на один и тот же график нанести несколько характеристик для разных анодных напряжений, то такой график будет называться семейством сеточных характеристик.

Сеточная характеристика позволяет наглядно определить, вносит ли лампа искажения, т. е. не изменяет ли она форму усиливаемого сигнала. А ведь в большинстве случаев очень важно, чтобы усилитель не только усиливал амплитуду входного сигнала, но усиливал без искажения формы, в этом вы еще много раз убедитесь! Теперь же выясним, как сделать так, чтобы лампа усиливала сигнал без искажения его формы.

Для начала на управляющей сетке лампы установим нулевое напряжение или, проще сказать, на управляющую сетку вообще не будем подавать напряжения, например, соединив ее с катодом. При этом, как видно из нашей характеристики, анодный ток лампы будет равен 10 *ма*. Далее начнем постепенно увеличивать напряжение на сетке. Анодный ток начнет возрастать, но вскоре его нарастание замедлится, и характеристика начнет загибаться. При напряжении на управляющей сетке +6 *в* анодный ток достигнет максимума и перестанет увеличиваться, несмотря на дальнейшее увеличение положительного напряжения на управляющей сетке. Такое состояние лампы называется насыщением: все электроны, испускаемые катодом, участвуют в образовании анодного тока, а также небольшого сеточного тока, ибо сетка сейчас по отношению к катоду заряжена положительно и выполняет роль маленького анода.

Если изменять напряжение на управляющей сетке от нуля в сторону отрицательных значений, то можно удостовериться, что в нижней части характеристики тоже имеется загиб, а при некотором отрицательном напряжении на управляющей сетке (в нашем случае — 9 *в*) произойдет отсечка анодного тока, т. е. анодный ток лампы прекратится — лампа «запрется».

Теперь подадим на управляющую сетку лампы переменное напряжение синусоидальной формы и посмотрим, как будет изменяться анодный ток лампы (рис. 25). Я думаю, вы догадываетесь, что решающую роль при этом будет играть амплитуда изменения входного напряжения. Но дело не только в амплитуде. Работа лампы зависит от положения на характеристике так называемой рабочей точки. Эта точка соответствует анодному току покоя, т. е. току при отсутствии переменного напряжения на управляющей сетке. В нашем случае, показанном на рис. 25, рабочая точка приходится на нулевое напряжение на управляющей сетке.

Посмотрим, при любом ли размахе сеточного напряжения анодный ток повторяет по форме это напряжение?

Из рисунка видно, что искажения формы анодного тока не будет только тогда, когда размах напряжения на сетке не будет заходить в области загибов сеточной характеристики, т. е. напряжение на управляющей сетке будет изменяться только в пределах линейного участка характеристики. Если же размах напряжения на

сетке будет таким, что крайние значения напряжения подойдут к областям насыщения и отсечки анодного тока, то появятся так называемые нелинейные искажения формы анодного тока, и форма этого тока не будет соответствовать форме управляющего напряжения на сетке.

Однако не только участки насыщения и отсечки вызывают искажение формы анодного тока. Мы упустили еще одно очень важ-

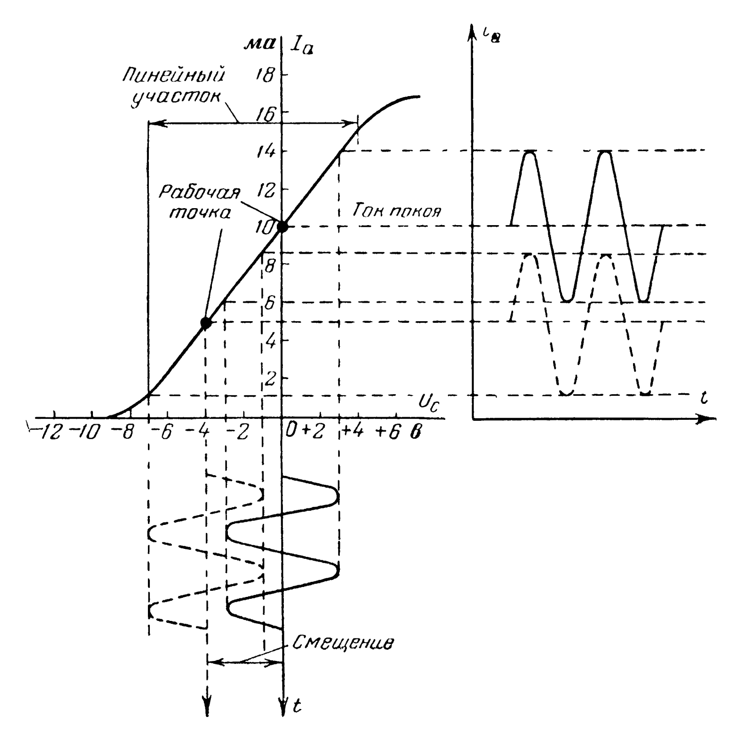


Рис. 25.

ное обстоятельство, а именно: появление сеточного тока при положительных значениях сеточного напряжения. Есть несколько причин, по которым этот ток влияет на форму анодного тока при работе лампы, и одна из них в том, что, притягивая электроны, сетка тем самым отнимает их у анода, вызывая уменьшение анодного тока, причем тем более резко, чем больше положительное напряжение на сетке. Все это приводит к тому, что весь участок характеристики, соответствующий положительным значениям сеточного напряжения, нельзя считать прямолинейным, и приходится отка-

заться от его использования, если необходимо избежать появления нелинейных искажений. Таким образом, лампа должа работать только при отрицательных напряжениях на сетке.

Как же сдвинуть входное напряжение на управляющей сетке в «отрицательную» область характеристики? Для этого надо, передвинуть влево рабочую точку, т. е. заранее подать на сетку лампы некоторое постоянное отрицательное напряжение (в нашем случае— —4 *в*, см. рис. 25). Тогда входной сигнал, складываясь с этим постоянным напряжением смещения рабочей точки, будет изменяться от —7 до —1 *в*.

Вот это напряжение смещения, определяющее положение рабочей точки, и задается цепочкой $R_к C_к$, включенной в катоде лампы в схеме на рис. 23. Образуется это напряжение следующим образом. По сопротивлению $R_к$ проходит катодный ток лампы, складывающийся в основном из анодного тока и токов сеток (например, экранирующей сетки у тетрода). В результате на сопротивлении происходит падение напряжения, причем полярность этого напряжения такова, что катод лампы оказывается положительным по отношению к управляющей сетке. Я думаю, понятно, что подача на катод положительного потенциала равносильна подаче на управляющую сетку отрицательного потенциала, поэтому рабочая точка лампы сместится в область отрицательных сеточных напряжений характеристики.

Однако если в цепь катода включить только сопротивление $R_к$ и не шунтировать его конденсатором, то лампа будет плохо работать. Как вы помните, величина напряжения смещения определяется током, проходящим через сопротивление $R_к$. Но когда на сетку лампы подано переменное напряжение сигнала, анодный ток лампы изменяется, а следовательно, изменяется и величина падения напряжения на сопротивлении $R_к$, причем чем больше мгновенное положительное напряжение сигнала на сетке, тем больше анодный ток лампы, тем больше падение напряжения на сопротивлении $R_к$ и, следовательно, тем больше рабочая точка сдвинута в отрицательную область сеточных напряжений характеристики. Таким образом, напряжение смещения на сопротивлении $R_к$ как бы противодействует входному сигналу, уменьшая усиление в моменты положительных значений входного напряжения и, наоборот, увеличивая усиление в моменты действия отрицательных значений входного напряжения. Такое противодействие напряжения на сопротивлении $R_к$ называется отрицательной обратной связью. В некоторых случаях такая отрицательная обратная связь полезна; она улучшает работу усилительных каскадов, и ее напряжение специально вводится в катодную или сеточную цепь лампы. Если же хотят избавиться от ее мешающего действия, то сопротивление $R_к$ шунтируют конденсатором $C_к$, ибо для переменного тока сопротивление конденсатора во много раз меньше сопротивления $R_к$. Естественно, что емкость этого конденсатора должна быть тем больше, чем ниже частоты, которые должны усиливаться без искажения.

Еще несколько слов о входной цепи усилителя. Часто в процессе работы требуется регулировать усиление. Для этого сигнал на сетку лампы подают через переменное сопротивление, как это показано на рис. 23,*в*.

Соперник электронной лампы, или чудесный кристалл

В последнее время ламповым усилителям, да и другим приборам на электронных лампах пришлось потесниться, уступив место полупроводниковым устройствам. Особенно заметно наступление полупроводников в автоматике, телемеханике, вычислительной технике, словом, там, где надежность, экономичность, малые габариты и малый вес играют решающую роль. Вначале многие скептически относились к этим маленьким, на вид хрупким колпачкам с тонкими гибкими ножками и странным характером работы, но скоро недоверие сменилось удивлением, а потом и уважением.

В чем же дело? Почему радиолампа — испытанный союзник ученых и инженеров, врачей и химиков, обеспечившая людям победы в науке, культуре и технике, — вдруг стала сдавать свои позиции?

В том и дело, что не «вдруг»! Ведь устройствам, в которых работают электронные лампы, поручают ответственнейшие задания. Им поручены человеческие жизни, тончайшие расчеты, а если учесть насыщенность современной военной техники радиоэлектронными приборами, то от надежности работы электронных ламп могут зависеть судьбы государств. Поэтому электронные лампы должны быть долговечны и абсолютно надежны в работе. А этого-то и нельзя сказать о них.

Жизнь радиолампы коротка — всего несколько сотен часов. Это связано с наличием в ней накаливающегося катода, который через определенное время теряет способность испускать электроны. Кроме того, нить накаливания может перегореть. И как много эта нить расходует электроэнергии!

А способность электронных ламп выдерживать тряску, удары, перегрузки? Если снять колбу электронной лампы, то вы увидите переплетение тончайших спиралек, маленькие хрупкие цилиндры, подвешенные на миниатюрных стеклянных или слюдяных стойках. Достаточно какой-нибудь из этих спиралек чуть-чуть сдвинуться с места — и электронная лампа вышла из строя. Разве может такая очень изящная конструкция выдержать удар, резкое сотрясение? И прибавьте, что все эти спиральки и цилиндрики должны находиться в вакууме! Словом, электронная лампа очень хороший прибор, но ...

В 20-х годах нашего столетия было сделано открытие, которое уже тогда всполошило специалистов. В Нижегородской лаборатории О. В. Лосев изготовил кристаллический прибор, который, как и электронная лампа, мог усиливать и генерировать электрические колебания. Были даже разработаны радиоприемники на открытых Лосевым кристаллах, так называемые «кристадины Лосева». Однако научной теории электронной природы кристаллов в то время не существовало. Совершенствование изобретения Лосева требовало накопления научных знаний, а в это время вакуумная техника быстро развивалась, электронные лампы набирали сил и совершенствовались, и об открытых Лосевым свойствах кристаллов вскоре забыли.

Шло время. Наука о строении вещества сделала огромные успехи. Ученые познали законы, управляющие движением электронов в веществе, поняли, почему одни вещества хорошо проводят электрический ток, а другие плохо, научились подчинять свойства

материи своей воле. Совокупность этих знаний, а также настойчивые напоминания инженеров, занимающихся радиоэлектроникой, автоматикой и другими областями техники, о недостатках электронных ламп привели к тому, что в конце 40-х годов свойство некоторых кристаллов проводить электрический ток вновь привлекло внимание ученых и изобретателей. И вот в 1958 г. американцы Д. Бардин и В. Брайттен изготавливают кристаллический усилительный прибор, так называемый полупроводниковый триод или транзистор. Проходит еще несколько лет, и уже никто не сомневается, что полупроводникам предстоит большое будущее.

Как же усиливают кристаллические приборы и чем они так выгодно отличаются от электронных ламп?

По представлениям современных физиков электрический ток создается свободными электронами, т. е. электронами, не связанными с атомами. В проводниках таких свободных электронов очень много. Когда к проводнику прикладывают электрическое напряжение, свободные электроны проводника образуют электрический ток. Поэтому электрическое сопротивление проводника мало. В диэлектриках же, наоборот, свободных электронов почти нет, все электроны жестко связаны с атомами, и, чтобы вырвать их у атомов и создать движение электронов в диэлектрике, требуется приложить очень большое электрическое напряжение. Именно поэтому электрическое сопротивление диэлектриков велико.

Но некоторые вещества, например германий и кремний, не похожи ни на проводники, ни на диэлектрики. Вернее, они одновременно являются и тем и другим. Их называют полупроводниками.

Большинство электронов в полупроводниках жестко связано с атомами, но все же в них есть электроны, которые при некотором внешнем воздействии тепла, света или электрического напряжения высвобождаются из-под власти атомов, причем характерно, что высвобождаются не только носители отрицательного электричества — электроны, но и носители положительного электричества — так называемые дырки. Если к полупроводнику приложено электрическое напряжение, то электроны начинают двигаться к положительному полюсу напряжения, а дырки — к отрицательному. В полупроводнике образуются два тока: электронный и дырочный. Конечно, не надо думать, что дырочный ток—это движущиеся атомы, потерявшие электроны. Действительно, дырки — это атомы, потерявшие электрон. Однако атомы в полупроводниках неподвижны. Они образуют кристаллическую решетку и очень прочно держатся на своих местах. Но атом, потерявший электрон, захватывает электрон соседнего атома и перестает быть дыркой. Соседний атом, отдавший ему свой электрон и в свою очередь превратившийся в дырку, захватывает электрон у другого атома и т. д. Поэтому, хотя атомы и остаются на своих местах, дырки передвигаются, причем в направлении, противоположном движению электронов.

Если к полупроводнику не приложено электрическое напряжение, то перемещение свободных электронов и дырок беспорядочно. Однако они стремятся равномерно распределиться по объему проводника. Это их стремление, характерное вообще для всех частиц материи, носит название диффузии. Но поскольку в проводнике существуют раздельно носители отрицательного электричества — электроны и носители положительного электричества — дырки, то

они не могут долго существовать. Действительно, достаточно свободному электрону наткнуться на нуждающийся в электроне атом (дырку), как он будет захвачен. При этом одновременно исчезнет и свободный электрон, и дырка. Такую «трагическую» встречу называют рекомбинацией.

Используя все эти особенности полупроводникового кристалла — наличие носителей отрицательного и положительного электричества, диффузию и рекомбинацию, оказалось возможным создать кристаллический прибор, способный усиливать электрические колебания. И решающим явилось то обстоятельство, что можно построить кристаллические решетки одного и того же полупроводника с различной электрической проводимостью: либо с ярко выраженной электронной проводимостью и подавленной дырочной, либо наоборот. Для этого надо в кристаллическую решетку вместо отдельных атомов полупроводника вставить атомы другого вещества. Если эти атомы будут иметь больше электронов, чем атомы полупроводника, то атомы примеси, в данном случае называемые донорами, отдадут их в виде свободных электронов, и такая решетка будет обладать выраженной электронной проводимостью (решетка *n*-типа). Наоборот, если у инородных атомов электронов будет меньше, чем у атомов полупроводника, то атомы примеси, в этом случае называемые акцепторами, будут стремиться захватить электроны у соседних атомов полупроводника, образовывая тем самым дырки, и такая решетка будет обладать выраженной дырочной проводимостью (решетка *p*-типа).

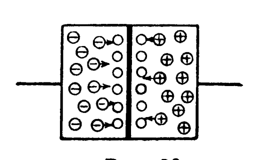


Рис. 26.

Если соединить полупроводники с решетками различных типов, то немедленно начнется диффузия электронов из полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа и, наоборот, дырок в полупроводник *n*-типа (рис. 26). Однако концентрация дырок в полупроводнике *n*-типа, несмотря на диффузию, не будет равномерной по всему объему, а будет уменьшаться по мере продвижения их в глубь этого полупроводника, так как они будут рекомбинировать с электронами — основными носителями электричества в полупроводнике *n*-типа. Точно так же концентрация электронов по мере их продвижения в глубь полупроводника *p*-типа от границы раздела будет убывать вследствие рекомбинации электронов с основными носителями электричества полупроводника *p*-типа — дырками.

Но одновременно с диффузией электронов в полупроводник *p*-типа концентрация их в полупроводнике *n*-типа у границы раздела уменьшится. Такому уменьшению будет способствовать еще и то, что перешедшие из полупроводника *p*-типа дырки рекомбинируют с имеющимися в полупроводнике *n*-типа около границы раздела электронами и тем самым тоже уменьшают их концентрацию. В результате концентрация электронов в полупроводнике *n*-типа у границы раздела настолько уменьшится, что их заряд уже не сможет компенсировать положительный заряд атомов-доноров, отдавших свои электроны. Поэтому в полупроводнике *n*-типа у границы раздела образуется положительный заряд.

Точно такое же явление произойдет и в полупроводнике *p*-типа, только в нем у границы раздела образуется отрицательный заряд

в результате того, что заряд основных носителей этого полупроводника — дырок, ушедших в полупроводник *n*-типа, не сможет скомпенсировать отрицательный заряд атомов-акцепторов, захвативших электроны. Таким образом, на границе соприкосновения двух полупроводников с различными типами проводимости образуется узкая область объемного электрического заряда и связанного с ним электрического поля, направленного от полупроводника *n*-типа к полупроводнику *p*-типа. Область этого заряда, обедненная свободными носителями электричества, имеет большее по сравнению с остальным объемом полупроводника электрическое сопротивление. Поэтому она называется запорным слоем. Система же, состоящая из двух полупроводников различного типа проводимости, разделенных запорным слоем, называют электронно-дырочным переходом (или *p—n* переходом).

Если к переходу приложить напряжение, причем плюс подать на полупроводник *n*-типа (*n*-область), а минус на *p*-область, то полупроводник будет включен в обратном или запорном направлении. В этом случае почти все внешнее напряжение будет приложено к запорному слою, так как его сопротивление значительно больше сопротивления остального объема полупроводника. Полярность же напряжения будет такова, что внешнее электрическое поле сложится с электрическим полем запорного слоя. В результате ширина запорного слоя увеличится, и диффузия дырок из полупроводника *p*-типа и электронов из полупроводника *n*-типа совершенно прекратится. Иными словами, электрическое сопротивление запорного слоя при его обратном включении очень велико.

При включении перехода в прямом направлении, т. е. плюс к *p*-области, а минус к *n*-области, внешнее электрическое поле будет направлено против электрического поля запорного слоя. В результате увеличится концентрация дырок в приграничном слое *p*-области и электронов в приграничном слое *n*-области. Поступившие электроны и дырки будут компенсировать электрические заряды атомов-доноров и атомов-акцепторов, объемный заряд перехода уменьшится, и запорный слой сузится. В результате возобновится переход электронов в *p*-область и дырок в *n*-область, т. е. сопротивление перехода уменьшится, и через него пойдет прямой ток, причем тем больший, чем больше внешнее напряжение.

Вероятно, вы уже заметили, что такой полупроводниковый прибор, состоящий из одного *p-n* перехода, можно использовать вместо двухэлектродной лампы, например, для детектирования, так как он обладает односторонней проводимостью. Эти приборы так и называются — полупроводниковые (германиевые или кремниевые) диоды, и они имеют сейчас очень широкое распространение, заменяя электронные лампы.

Ну, а как же насчет усиления? Какая же «сетка» требуется кристаллическому диоду, чтобы он, как и лампа в свое время, из диода превратился в усилительный прибор?

Полупроводниковый триод — транзистор — состоит из трех слоев полупроводников с различной проводимостью: крайние — с дырочной, а между ними (так называемая база) — с электронной проводимостью (рис. 27). Схематично такая система записывается *p-n-p*. Таким образом, транзистор имеет два перехода: *p-n* и *n-p*. Первый переход (*p-n*) включен в прямом направлении, т. е. минус

к *n*-области, а плюс к *p*-области, называемой в этом случае эмиттером. Поэтому через этот переход проходит прямой ток.

Второй переход (*n-p*) включен в обратном направлении, т. е. плюс к базе (*n*-область), а минус к *p*-области, называемой коллектором. Поэтому, по нашим предыдущим рассуждениям, ток через коллекторный переход не должен проходить. Но в данном случае это не так.

Дело в том, что полупроводники, из которых изготовлены эмиттер и база, подобраны с различной концентрацией основных носителей, т. е. концентрация дырок в эмиттере значительно выше концентрации электронов в базе. Поэтому, когда в результате протекания тока через эмиттерный переход в базу попадают дырки,

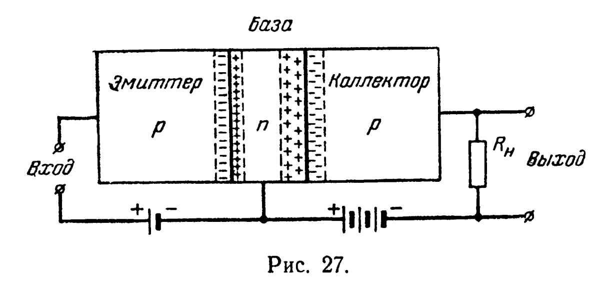


Рис. 27.

то их оказывается там так много, что только малая часть из них находит в базе необходимые для рекомбинации электроны. Эмиттер как бы насыщает базу дырками (физики говорят: происходит инжекция дырок в базу). Благодаря диффузии пришедшие дырки начинают перемещаться в те области базы, которые прилегают к коллектору. Но, как вы помните, к коллекторному переходу приложено обратное напряжение и довольно значительное по величине — в десятки раз больше напряжения, приложенного к эмиттерному переходу, причем полярность коллекторного напряжения такова (на коллекторе минус), что положительные дырки, подойдя к коллекторному переходу, испытывают действие сильного ускоряющего поля, переходят в коллектор и рекомбинируют с электронами, приходящими в коллектор из отрицательного полюса батареи питания. В результате через коллекторный переход проходит электрический ток, несмотря на то, что к нему приложено обратное напряжение.

Но самое замечательное, что величина коллекторного тока зависит от величины тока эмиттера! Действительно, чем больше ток через эмиттерный переход, т. е. чем больше дырок «впрыскивает» эмиттер в базу, тем больше ток коллектора, который зависит от количества этих дырок. Поэтому, управляя эмиттерным током, можно тем самым управлять и коллекторным током.

Попробуем провести аналогию между транзистором и электронной лампой. В лампе током анода управляет сетка, а в транзисторе током коллектора управляет ток эмиттера. В лампе незначительное изменение напряжения на сетке вызывало значительное изменение напряжений на аноде лампы. В транзисторе незначительное изменение напряжения на эмиттерном переходе или, что

то же, изменение тока через эмиттерный переход в цепи с низким напряжением (доли вольта) вызывает по существу такое же изменение тока коллектора в цепи с высоким напряжением (до десятка и даже больше вольт). Иначе говоря, изменение напряжения в доли вольта на эмиттерном переходе вызывает изменение напряжения на коллекторном переходе, измеряемое уже вольтами.

Чтобы убедиться в этом, проделаем простейший расчет. Допустим, что изменение напряжения на эмиттерном переходе в 0,05 *в* вызвало изменение тока через этот переход в 0,1 *ма*. С некоторым приближением можно считать, что коллекторный ток при этом тоже изменится на 0,1 *ма*. Предположим далее, что в цепи коллектора стоит нагрузочное сопротивление в 10 *ком*. Тогда изменение падения напряжения на этом сопротивлении будет:

$$\Delta U = IR = 0{,}0001 \cdot 10\,000 = 1 \text{ в}.$$

Сравните: 0,05 *в* и 1 *в*! Усиление налицо!

Таков соперник электронной лампы. Он прост по конструкции, практически вечен в работе, прочен и чрезвычайно мал по размерам. Эти его качества позволили создать надежные и очень компактные автоматические устройства, потребляющие в тысячи раз меньше электроэнергии, чем прежние громоздкие ламповые устройства.

О капризах полупроводниковых усилителей

Давайте возвратимся из путешествия в область полупроводниковой техники и продолжим разговор об усилителях низкой частоты.

Надо сказать, что усилители, о которых мы раньше говорили, могут работать и на транзисторах, причем как мощные выходные

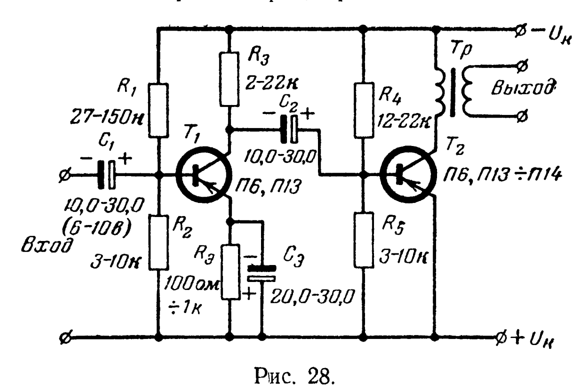


Рис. 28.

каскады, так и каскады предварительного усиления. На рис. 28 приведена схема усилителя на транзисторах с однотактным выходным каскадом, а на рис. 29 — схема усилителя с двухтактным выходным каскадом. Работа первого усилителя в принципе не отличается от работы такого же лампового усилителя. Однако транзисторы как элементы электронной схемы имеют особенности по

сравнению с электронными лампами, и об этих особенностях я сейчас расскажу.

Дело в том, что у транзисторов токи *p-n*-переходов, а следовательно, и положение рабочей точки на характеристике зависят от температуры и у различных транзисторов одной и той же марки могут значительно отличаться. Эта их неприятная особенность ведет к тому, что если не принять особых мер, то схема, налаженная при определенной температуре и данном экземпляре транзистора, будет вести себя иначе при другой температуре и другом транзисторе той же марки. Более того, если не принять мер для температурной стабилизации режима транзистора, то изменение температуры может сместить рабочую точку в область насыщения, и транзистор выйдет из строя.

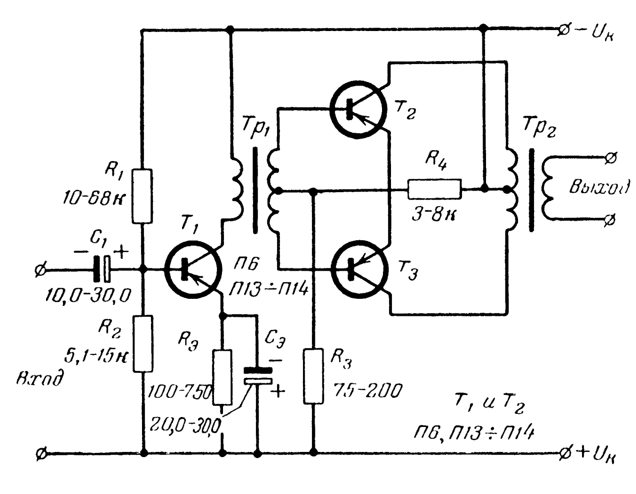


Рис. 29.

Чувствительность транзисторов к изменению температуры в основном объясняется сильной зависимостью начального коллекторного тока $I_{к0}$ и тока базы $I_б$ от температуры. У германиевых транзисторов начальный коллекторный ток изменяется примерно в 2 раза на каждые 11° С изменения температуры перехода. Изменение начального коллекторного тока приводит к изменению полного коллекторного тока, равного $I_к = I_{к0} + \beta I_б$, т. е. складывающегося из начального коллекторного тока и тока базы $I_б$, умноженного на коэффициент усиления β по току. Как уже было сказано, при изменении температуры изменяются оба тока, но изменение тока базы $I_б$ наиболее сильно влияет на величину тока коллектора, так как его изменение усиливается в β раз, причем β обычно составляет 10—60. Поэтому в первую очередь надо стабилизировать ток базы. Тогда изменение полного коллекторного тока будет определяться только изменением начального коллекторного тока, который по абсолютной величине изменяется незначительно — не более десятков

микроампер. Еще лучше стабилизировать ток эмиттера, так как именно он, как вы помните, определяет величину тока коллектора.

В схеме усилителя на рис. 28 элементами температурной стабилизации транзистора T_1 (ведь стабильность его режима наиболее существенна, так как все отклонения в его работе будут затем усилены оконечным каскадом) являются делитель из сопротивлений R_1 и R_2 и сопротивление $R_э$ в цепи эмиттера. Сопротивления R_1 и R_2 делят напряжение источника питания как бы на два источника, один из которых включен между коллектором и базой, а другой — между базой и эмиттером. Это жестко фиксирует напряжение на базе триода. Сопротивление же $R_э$ создает цепь отрицательной обратной связи по току (вспомните наш разговор о сопротивлении в цепи катода электронной лампы).

Работает схема температурной стабилизации следующим образом. Предположите, что в результате перемены температуры изменился ток эмиттера, и это вызвало изменение токов базы и коллектора. Может также измениться ток базы или обратный ток коллектора. Словом, причина безразлична, но важно, что при этом изменился ток, проходящий через сопротивление $R_э$ в цепи эмиттера. Если ток через сопротивление увеличился, то увеличится падение напряжения на сопротивлении, причем полярность этого напряжения будет такова, что смещение на базе транзистора увеличится, т. е. база станет менее отрицательной по отношению к эмиттеру. В результате ток через эмиттерный переход уменьшится, а следовательно, уменьшатся и токи базы и коллектора.

При уменьшении тока через сопротивление $R_э$ в цепи эмиттера триода все происходит наоборот. Таким образом, действие напряжения обратной связи, выделяющегося на этом сопротивлении, автоматически стабилизирует режим работы транзистора. Как и в ламповой схеме, это сопротивление надо шунтировать конденсатором, чтобы отрицательная обратная связь действовала только на постоянном токе, не нарушая работу транзистора на переменном токе.

Нам осталось рассмотреть работу двухтактной схемы выходного каскада (рис. 29). По существу двухтактный каскад — это как бы два однотактных, но включенных «вверх ногами» по отношению друг к другу. Такое включение приводит к тому, что при нарастании усиливаемого напряжения на входе одного каскада на входе другого каскада напряжение убывает. В результате ток на выходе первого каскада увеличивается, а на выходе другого уменьшается. Это значительно повышает экономичность и эффективность работы схемы.

Наконец, несколько слов о величине емкости переходного конденсатора, связывающего по переменному току выход каскада предварительного усиления с входом оконечного каскада. Чтобы этот конденсатор пропускал без искажения все частоты, подлежащие усилению, его сопротивление для этих частот должно быть малым. Сопротивление же конденсатора тем больше, чем ниже частота (для постоянного тока оно в принципе бесконечно). Поэтому емкость переходного конденсатора должна быть тем больше, чем ниже самая низкая частота, пропускаемая усилителем, и чем меньше сопротивление в цепи сетки лампы следующего каскада (влияние этого сопротивления вы поймете позднее). В транзисторных усилителях, у которых входное сопротивление каскада всегда

мало по сравнению с входным сопротивлением усилительного каскада на электронной лампе, емкость переходного конденсатора должна быть большой — до 30 *мкф*.

Не простое дело — усиливать импульсы!

В автоматике, телемеханике, в вычислительной технике, да и во многих других случаях приходится усиливать импульсы напряжения и тока, которые действуют в течение короткого промежутка времени. По форме импульсы могут быть самые различные: треугольные, прямоугольные, трапецеидальные и пр. (рис. 30). Надо сказать, что усиление импульсов — дело непростое, так как для неискаженного усиления импульсов усилитель должен пропускать без искажения очень широкую полосу частот: от десятков герц до нескольких миллионов герц.

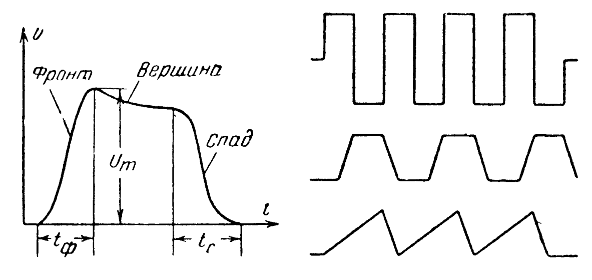


Рис. 30.

Такая широкая полоса усиливаемых частот необходима потому, что импульсы как бы состоят из огромного числа синусоидальных напряжений самых различных частот и амплитуд, сдвинутых друг относительно друга на определенный фазовый угол. Вот эти частоты и необходимо усилить без искажения, сохранив соотношения их амплитуд и фазовых сдвигов. Только в этом случае импульс на выходе усилителя не будет отличаться по форме от импульса, поданного на вход.

Однако прежде чем говорить о широкополосных усилителях, надо получше разобраться в искажениях, имеющих место в усилителях. С одним видом искажений мы уже встречались. Это нелинейные искажения, вызванные нелинейностью ламповых (а также транзисторных) характеристик. Но в усилительных схемах существуют и другие искажения, например частотные и фазовые, которые могут быть оценены при помощи частотных и фазовых характеристик усилителя. Частотный характеристикой называется зависимость величины усиления от частоты усиливаемых синусоидальных колебаний. Фазовой характеристикой называется зависимость величины угла фазового сдвига от частоты усиливаемых колебаний. Фазовые искажения будут отсутствовать в том случае, если фазовый сдвиг между отдельными частотами в усилителе равен нулю либо пропорционален частоте этих колебаний.

Другой вид искажений — это электрические шумы, т. е. посторонние электрические сигналы на выходе усилителя, которые рождаются в самом усилителе. При прохождении через усилитель сигнала шумы складываются с ним и тем самым искажают его форму. Основная причина появления шумов — в беспорядочном тепловом движении электронов в лампах, транзисторах и сопротивлениях схемы (так называемые флуктуации); кроме того, определенную роль играет пульсация питающего напряжения — фон переменного тока, наличие различных переменных магнитных и электрических полей («наводки»).

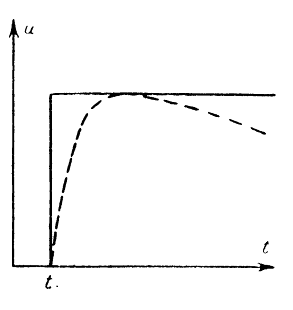


Рис. 31.

Для оценки качества широкополосных усилителей удобно пользоваться не частотной и фазовой характеристиками, а так называемой переходной характеристикой, которая показывает, как усилитель воспроизводит на выходе перепад напряжений, поданный на его вход. Предположите, что вначале на входе усилителя нет никакого напряжения. Затем в какой-то момент времени мгновенно подадим на его вход постоянное напряжение, величина которого в дальнейшем остается неизменной (рис. 31). Надо заранее сказать, что никакой усилитель не сможет воспроизвести на выходе без искажений такую форму входного сигнала — такой перепад напряжений. Форма сигнала на выходе усилителя примет вид, показанный на рис. 31 пунктиром. Этот пунктир и есть переходная характеристика усилителя. По степени ее приближения к форме входного перепада можно судить о способности усилителя усиливать очень быстрые и очень медленные изменения входного напряжения, судить о вносимых усилителем искажениях на высоких и низких частотах.

Нельзя не рассказать об этом

Теперь нам придется на время отвлечься от усилителей и поговорить казалось бы о чисто теоретических проблемах: о прохождении импульсов через различные электрические цепи.

Поверьте, это необходимо! Иначе вы не поймете физических процессов в усилительных схемах и схемах электронных реле, о которых мы будем говорить позднее. Да и в дальнейшем нам столько раз придется встречаться с импульсами, что надо знать о них побольше.

Составим самую простую цепь из сопротивления R и конденсатора C, называемую цепью RC, и посмотрим, как изменяются ток и напряжение в этой цепи при подключении ее к источнику постоянного напряжения U (рис. 32). Иначе говоря, подадим на вход этой цепи перепад напряжений.

В исходном состоянии батарея отсоединена от цепи (переключатель $П$ в положении 1) и конденсатор C разряжен, т. е. напряжение U_C на нем равно нулю. Напряжение U_R на сопротивлении при этом также равно нулю. При подключении к цепи батареи (пе-

реключатель в положении 2) начинается процесс заряда конденсатора C. Заряд конденсатора не может произойти мгновенно по следующим причинам. Когда конденсатор заряжен, между его пластинами существует разность потенциалов, а значит, и электрическое поле, обладающее энергией. Поэтому если предположить, что заряд конденсатора произошел мгновенно в момент подключения батареи к цепи, то и электрическое поле между его пластинами должно возникнуть мгновенно. Это в свою очередь означает, что и

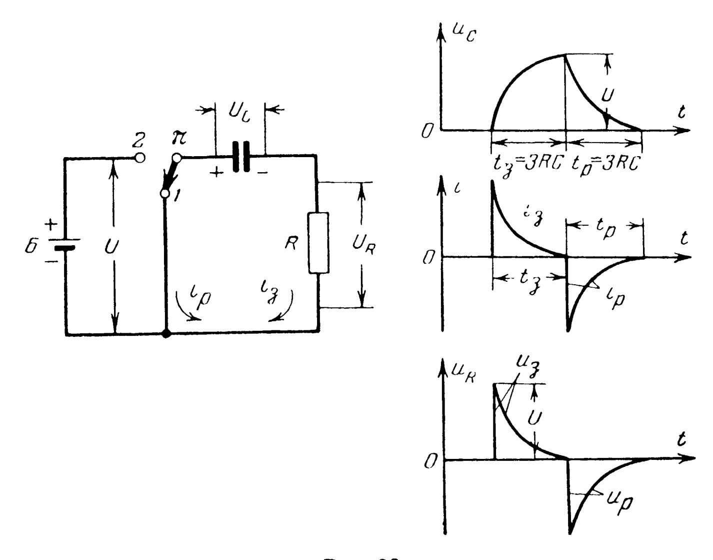


Рис. 32.

энергия электрического поля, первоначально равная нулю, мгновенно увеличилась до некоторой величины. Но в этом случае источник зарядного тока должен обладать бесконечно большой мощностью. На самом деле это невозможно, поэтому заряд (как и разряд) конденсатора протекает в течение некоторого, может быть очень малого, но конечного промежутка времени.

А вот ток, проходящий через конденсатор, может изменяться мгновенно (скачком), так как энергия электрического поля при этом не изменится.

Итак, при подключении батареи начинается постепенный заряд конденсатора током $i_з$:

$$i_з = \frac{U - u_C}{R}.$$

Напряжение u_C на конденсаторе в первое мгновение после подключения батареи равно нулю, поэтому величина тока $i_з$ заряда конденсатора будет определяться величиной сопротивления R, на

котором возникает скачок напряжения, равный э д. с. батареи:

$$u_R = i_з R = \frac{U}{R} R = U.$$

Напряжение u_C на конденсаторе постепенно увеличивается, стремясь к напряжению U батареи. При этом напряжение u_R на сопротивлении R, равное $u_R = i_з R = U - u_C$, стремится к нулю. Скорость нарастания напряжения u_C и спадания u_R определяется величиной произведения RC сопротивления и емкости, которое носит название постоянной времени цепи и обозначается буквой τ. Запомните, пожалуйста, это название! Чем больше τ, тем меньше скорость нарастания напряжения u_C.

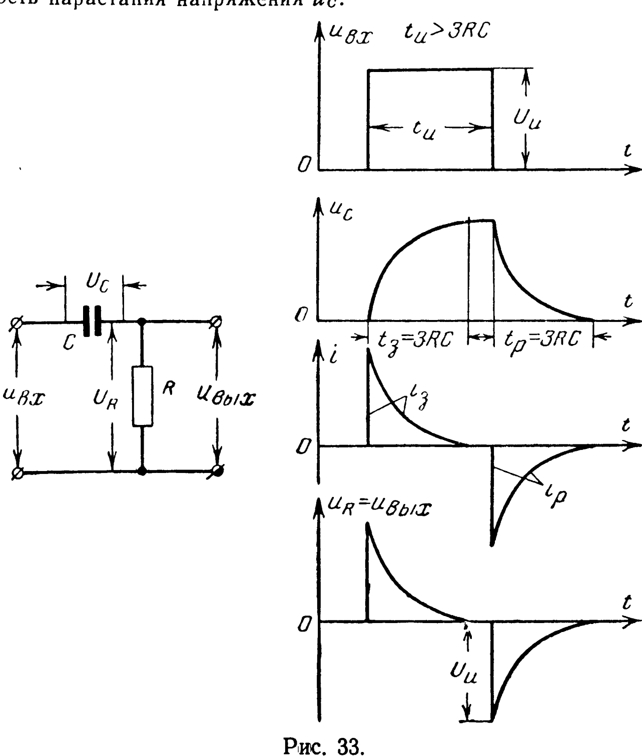


Рис. 33.

Строго говоря, напряжение на конденсаторе достигнет напряжения батареи, от которой он заряжается, только через бесконечно долгое время. На практике же считают, что конденсатор зарядился, если напряжение на нем достигло 0,95 напряжения источника. Это произойдет спустя время, равное трем постоянным времени цепи:

$$t = 3RC = 3\tau \text{ сек}.$$

Когда переходный процесс закончится (конденсатор C зарядится до $0{,}95\,U$), переведем переключатель $П$ в положение *1*. Конденсатор C окажется замкнутым на сопротивление R, и в цепи появится ток $i_р$ разряда конденсатора. Так как положительная пластина конденсатора присоединена теперь к нижнему концу сопротивления R, то направление тока разряда $i_р$ обратно направлению тока заряда $i_з$. Поэтому новый скачок напряжения u_R на сопротивлении R имеет отрицательную полярность.

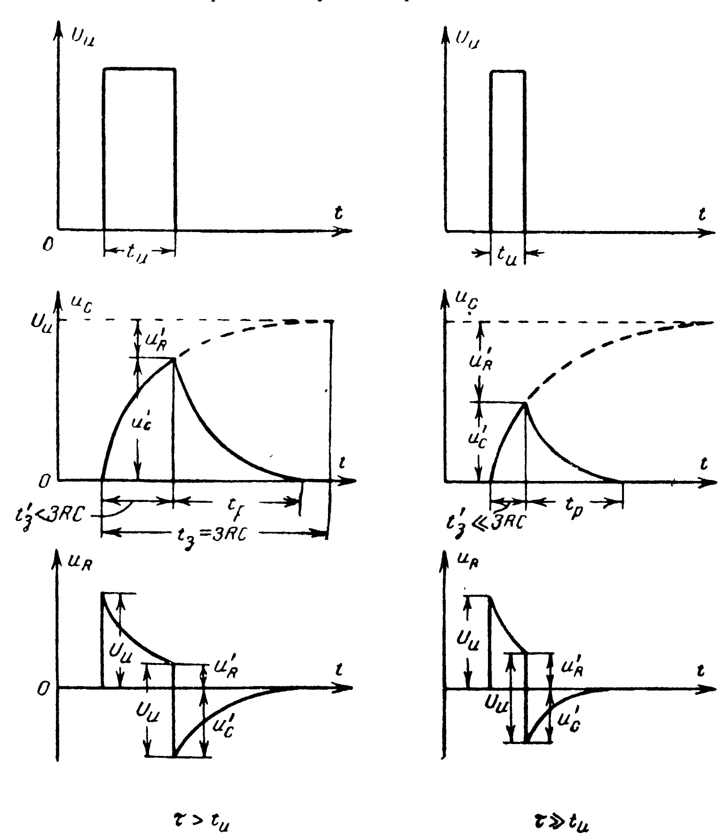


Рис. 34.

Все, что говорилось о заряде конденсатора, полностью относится и к его разряду: напряжение u_C спадает в соответствии с постоянной времени цепи; также спадают разрядный ток $i_р$ и напряжение u_R на сопротивлении R, только их направление противоположно зарядному. Спустя $3RC$, *сек*, конденсатор практически разрядится.

Такая же картина будет и в том случае, если на вход цепи подать не постоянное напряжение от батареи, а прямоугольный импульс, длительность $t_и$ которого больше длительности переходного процесса (рис. 33). Тогда от фронта импульса конденсатор C начнет заряжаться, и на выходе цепи (на сопротивлении R) возникнет остроконечный импульс, спадающий по экспоненциальной кривой с постоянной времени τ. Полярность этого импульса одинакова с полярностью прямоугольного входного импульса. Спад же входного прямоугольного импульса вызовет появление на выходе цепи второго остроконечного импульса, полярность которого противоположна полярности входного импульса.

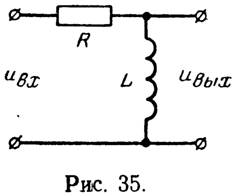


Рис. 35.

Таким образом, вместо одного входного прямоугольного импульса на выходе цепи RC, постоянная времени которой меньше длительности входного импульса, появляются два остроконечных более коротких импульса различной полярности. Расстояние между ними во времени равно длительности $t_и$ входного импульса. Такая цепь называется дифференцирующей.

Если же постоянная времени RC-цепи будет больше длительности входного импульса, то процесс прохождения импульса через RC-цепь будет совершенно иным. Ведь в этом случае входной импульс окончится раньше, чем закончится переходный процесс заряда конденсатора. В момент окончания прямоугольного входного импульса напряжение на конденсаторе будет меньше напряжения импульса $U_и$ и равно u'_C. Поэтому напряжение на выходе цепи (рис. 34)

$$u'_R = U_и - u'_C.$$

После окончания входного импульса напряжение u'_C, до которого заряжен конденсатор, вызовет скачок отрицательного напряжения на сопротивлении R, равный $-u'_C$, т. е. напряжение на сопротивлении изменится скачком от u'_R до $-u'_C$, или

$$u'_R - (-u'_C) = U_и,$$

и конденсатор начнет заряжаться далее как обычно.

Если постоянную времени τ цепи RC увеличивать, то напряжение u'_R будет стремиться к значению напряжения входного импульса $U_и$, а напряжение u'_C — к нулю. При очень большой величине τ ($\tau \gg t_и$) прямоугольный импульс пройдет через цепь RC практически без искажений. Такая цепь RC называется переходной.

Теперь посмотрим, как проходит прямоугольный импульс через цепь RL. Надо сказать, что переходные процессы в этой цепи сходны с процессами в цепи RC. Так, если на вход цепи RL подать прямоугольный импульс длительностью $t_и$ (рис. 35), то ток в катушке индуктивности L, до этого равный нулю, не может возрасти скачком, так как это означало бы мгновенное изменение энергии, запасенной в магнитном поле катушки. Поэтому ток через катушку в первый момент после скачка останется равным нулю. Это значит, что падение напряжения на сопротивлении R тоже будет равно нулю, и все напряжение входного импульса падает на катушке L. Затем ток через катушку начинает нарастать по экспо-

ненциальному закону с постоянной времени $\tau = L/R$. Напряжение u_L на катушке при этом уменьшается, а падение напряжения на сопротивлении R увеличивается. Через промежуток времени 3τ напряжение u_L практически снизится до нуля, а напряжение u_R возрастет до величины $U_и$ (рис. 36).

Во время спада входного импульса начинается обратный процесс, при котором напряжение u_R экспоненциально уменьшается до

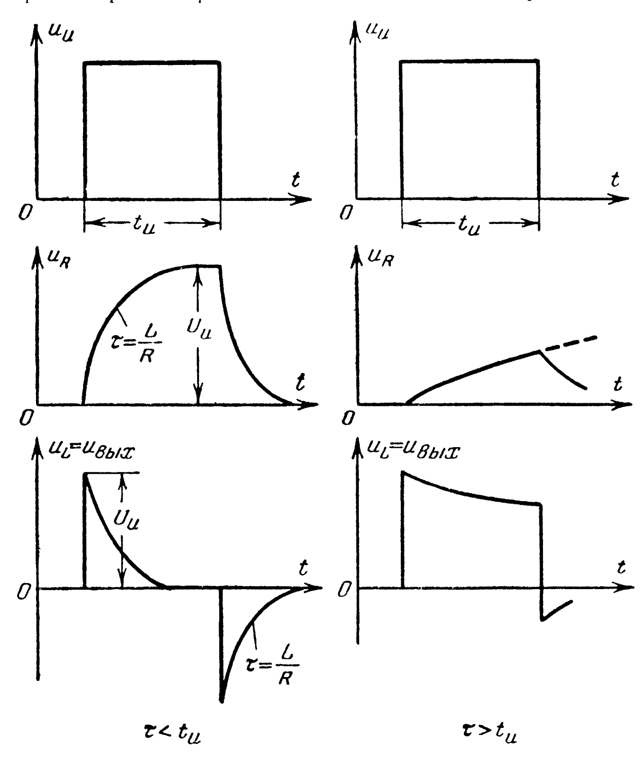


Рис. 36.

нуля, а напряжение u_L на выходе цепи RL скачком возрастает до значения $-U_и$ и затем экспоненциально стремится к нулю.

Если постоянная времени τ значительно превосходит длительность входного импульса, то напряжение на катушке искажается незначительно, сохраняя форму входного импульса.

Почему усилители не могут быть идеальными

Теперь мы можем вернуться к широкополосным усилителям. Давайте рассмотрим причины искажения прямоугольных импульсов при прохождении их через усилитель. На рис. 37,*а* показана схема

обычного усилителя с реостатно-емкостной связью между каскадами, а на рис. 37,*б* — его эквивалентная схема, т. е. такая схема, в которой вместо электронной лампы учитываются только токи и напряжения, действующие в ее цепях, а вместо деталей учтены только те емкости и сопротивления, которые оказывают влияние на распределение этих токов и напряжений в реальной схеме.

Цепь R_cC_c представляет собой делитель напряжения. Выходное напряжение каскада $U_{вых}$ снимается с сопротивления R_c. Мы уже говорили о конденсаторе C_c и его емкости. Чтобы не было бесполезного падения напряжения на этом конденсаторе, емкость его

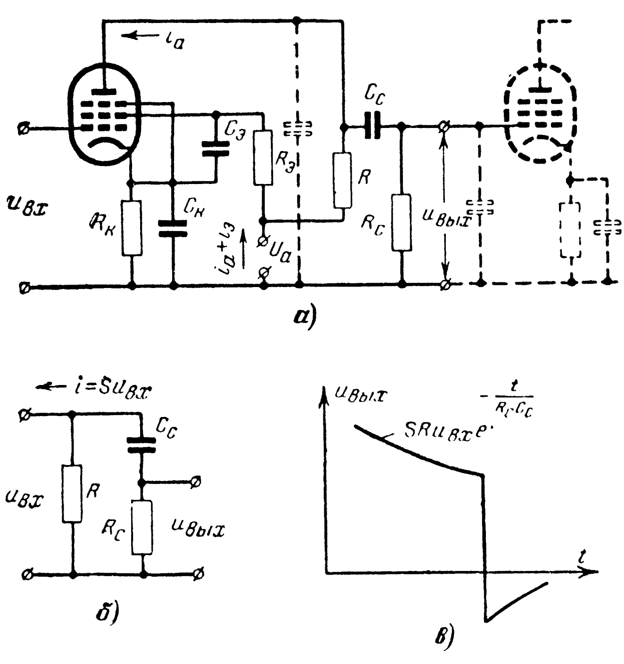


Рис. 37.

должна быть значительной. Тогда постоянная времени цепи R_cC_c будет достаточно велика, и напряжение сигнала почти не будет затрачиваться на заряд конденсатора (вспомните предыдущий разговор о цепи RC!). Как известно, сопротивление конденсатора (а именно оно определяет величину падения напряжения на конденсаторе) зависит от частоты проходящего через него тока. Поэтому на низких частотах заметная часть напряжения упадет на конденсаторе, и падение напряжения $U_{вых}$ на сопротивлении R_c составит лишь часть общего падения напряжения в цепи, т. е. усиление каскада по сравнению с усилением на более высоких частотах, для которых τ цепи R_cC_c очень велико, уменьшится. Кроме того, наличие емкости C_c искажает форму проходящего через каскад прямо-

угольного импульса, а вы помните, что нарастание и спадание напряжения на конденсаторе происходят не мгновенно, а постепенно по экспоненциальному закону. При подаче на управляющую сетку лампы прямоугольного импульса (перепада напряжений) начнет протекать ток $SU_{вх}$ (S — крутизна характеристики лампы, ее усилительная способность), создающий падение напряжения $SRU_{вх}$, где R — анодная нагрузка. Это напряжение и является источником для заряда конденсатора $C_с$. Напряжение же на сопротивлении $R_с$ будет определяться разностью между напряжениями $SRU_{вх}$ и напряжением на конденсаторе $C_с$, т. е. зависеть от постоянной времени цепи $R_сC_с$. Таким образом, после появления напряжения $SRU_{вх}$ напряжение на конденсаторе $C_с$ постепенно нарастает, а напряжение на управляющей сетке лампы последующего каскада уменьшается, в результате чего уменьшается усиление этого каскада. В этом и заключается низкочастотное искажение импульса, выражающееся в наклоне и вогнутости «плоской» вершины импульса.

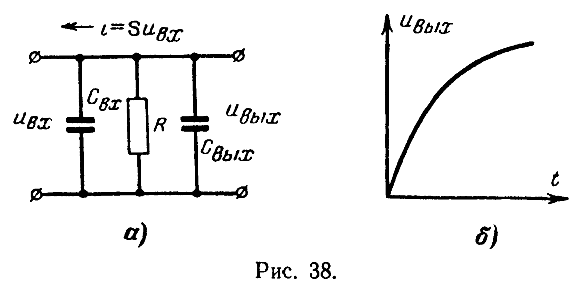


Рис. 38.

После прохождения импульса напряжение на сетке лампы спадает не мгновенно, так как для разряда конденсатора $C_с$ требуется время, которое зависит от постоянной времени его цепи. Разряд конденсатора $C_с$ происходит через сопротивление $R_с$, сопротивление R и через внутреннее сопротивление источника анодного питания, которое обычно мало. Как вы помните, направление тока разряда конденсатора обратное по отношению к току заряда. Это означает, что после окончания входного импульса напряжение на выходе усилителя не исчезнет, а изменит знак и начнет постепенно спадать (рис. 37,*в*). Это еще одно низкочастотное искажение импульса. Замечу, что угол сдвига фаз возрастает с уменьшением частоты.

На высоких частотах постоянная времени τ цепи $R_сC_с$ по сравнению с длительностью периода колебаний (или длительностью входного импульса, что одно и то же) настолько велика, что влияние конденсатора $C_с$ будет незначительным и его можно не учитывать. Сопротивление $R_с$ велико по сравнению с сопротивлением R, и его можно тоже исключить из эквивалентной схемы (рис. 38,*а*). Основную роль в возникновении искажений на высоких частотах играют входные и выходные емкости ламп и монтажа, обозначенные на эквивалентной схеме $C_{вых}$ и $C_{вх}$. По мере увеличения частоты сопротивление этих емкостей уменьшается, и они все больше шунтируют сопротивление нагрузки R. Общее сопротивление парал-

льно соединенных сопротивления R и емкостей $C_{вых}+C_{вх}$ по мере увеличения частоты уменьшается, поэтому уменьшается и падение напряжения на этой цепочке, а следовательно, и коэффициент усиления каскада. Правда, можно несколько ограничить это явление путем уменьшения величины сопротивления R. Тогда шунтирующее действие емкостей будет сказываться не так резко. Однако уменьшение величины сопротивления нагрузки ведет к уменьшению коэффициента усиления вообще на всех частотах.

Такое влияние емкостей $C_{вых}$ и $C_{вх}$ на форме импульса скажется следующим образом. Возникший в анодной цепи в момент появления фронта импульса ток вначале не создаст в сопротивлении R нагрузки никакого падения напряжения, ибо в первое мгновение сопротивление емкостей $C_{вых}$ и $C_{вх}$, шунтирующих это сопротивление, равно нулю. Весь ток потечет через эти емкости, заряжая их. По мере заряда распределение токов между емкостями и сопротивлением R меняется. Все бо́льшая часть тока начинает протекать по сопротивлению, и падение напряжения на нем увеличивается. По истечении некоторого промежутка времени заряд емкости заканчивается, и весь ток $SU_{вх}$ будет протекать через сопротивление R, создавая выходное напряжение $SRU_{вх}$. Быстрота установления напряжения на емкостях $C_{вых}$ и $C_{вх}$ зависит от постоянной времени цепи $R(C_{вых}+C_{вх})$. Таким образом, вместо крутого фронта входного сигнала напряжение на выходе усилителя не сразу достигнет максимального значения (рис. 38,*б*). Чем меньше постоянная времени $R(C_{вых}+C_{вх})$, тем быстрее напряжение достигнет максимальной величины.

Величина фазового сдвига на высоких частотах тем больше, чем выше частота, но угол сдвига отрицателен по отношению к углу фазового сдвига на низких частотах.

Как же избавиться от искажений?

Можно их компенсировать. На рис. 39,*а* приведена схема усилителя с параллельной компенсацией усиления на высоких частотах, а на рис. 39,*б* — его эквивалентная схема. На низких и средних частотах сопротивление шунтирующих емкостей $C_{вых}$ и $C_{вх}$ велико, сопротивление индуктивности L в последовательной цепи мало, поэтому ими можно пренебречь и считать, что нагрузкой является только сопротивление R. При увеличении частоты сопротивление емкостей сильно уменьшается и частотная характеристика при отсутствии индуктивности должна была бы спадать. Но благодаря наличию индуктивности все происходит иначе.

Дело в том, что в области частот, усиление на которых начинает спадать, проявляются резонансные свойства колебательного контура, образованного L, C и R. Сопротивление этого контура вблизи резонансной частоты наибольшее, а усиление каскада прямо пропорционально сопротивлению нагрузки (об этом мы уже говорили). Для постоянства усиления необходимо, чтобы величина нагрузки на всех частотах оставалась постоянной. Увеличение сопротивления контура, который в данной схеме является нагрузкой, по мере приближения к резонансной частоте компенсирует шунтирующее действие емкостей $C_{вых}$ и $C_{вх}$ на высоких частотах. Таким образом, общая величина сопротивления нагрузки остается постоян-

ной, и полоса частот, пропускаемых усилителем, расширяется, а значит, уменьшаются искажения импульсов.

Резонансная частота контура выбирается близкой к частоте, при которой в обычных условиях (при отсутствии компенсации) усиление начинает заметно падать Понижение резонансной частоты вы-

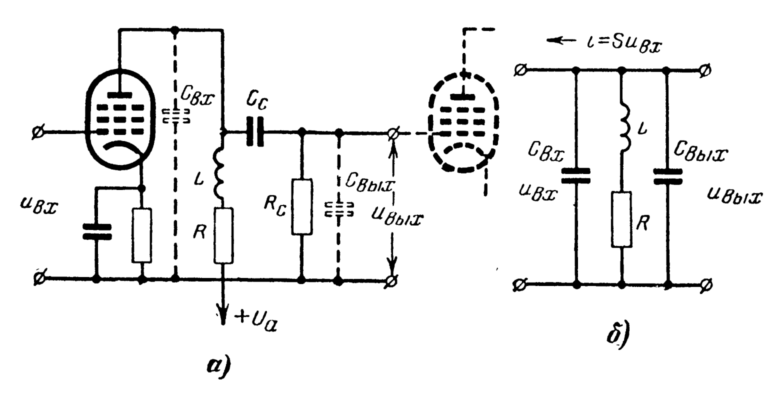


Рис. 39.

зывает ненужный подъем частотной характеристики в области высоких частот. Если же собственная частота контура выбрана выше этой граничной частоты, то между частотами равномерного усиления и частотой, при которой начинается компенсация, появится провал характеристики.

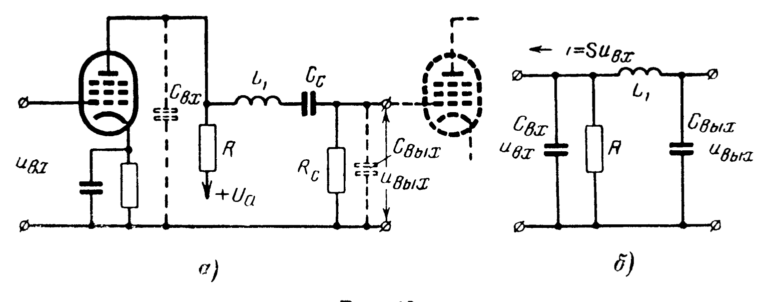
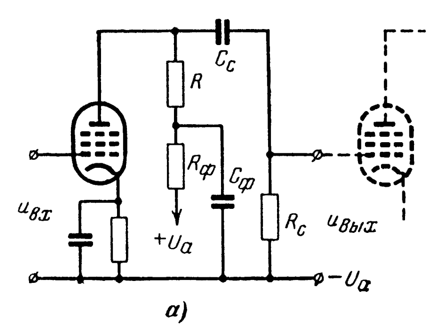


Рис. 40.

На частотах, превышающих резонансную, усиление снова спадает, так как сопротивление контура на этих частотах уменьшается.

На рис. 40 приведена схема другой высокочастотной компенсации. Индуктивность L_1 включается последовательно, поэтому и компенсация называется последовательной. В этой схеме использованы те же элементы, что и в схеме рис. 39, однако принцип действия ее иной. В области низких и средних частот сопротивление индуктивности L_1 очень мало, а сопротивление емкостей $C_{вых}$ и

$C_{вх}$ очень велико, и усиление на этих частотах определяется только величиной сопротивления нагрузки R. По мере повышения частоты емкостное сопротивление $C_{вх}$ (входная емкость лампы+емкость монтажа левее индуктивности) уменьшается и начинает сказываться ее шунтирующее действие. Но при этом емкость $C_{вх}$ как бы отделена от емкости $C_{вых}$ индуктивностью L_1, сопротивление которой при повышении частоты возрастает (так как частота приближается к резонансной частоте колебательного контура, образованного индуктивностью L_1 и емкостью $C_{вых}$). Емкость $C_{вх}$ меньше суммарной емкости $C_{вых}+C_{вх}$, поэтому частоты, на которых сопротивление емкости $C_{вх}$ значительно уменьшается, несколько выше, чем при шунтировании нагрузки R суммарной емкостью.



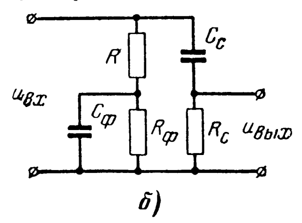


Рис. 41.

Данная схема позволяет получить примерно на 20% большее усиление, чем схема с параллельной компенсацией (при той же полосе частот).

А теперь о низкочастотной компенсации. Включим в анодную цепь сопротивление $R_ф$ и конденсатор $C_ф$ (рис. 41). Допустим, что сопротивление $R_ф$ очень велико, и поэтому оно не оказывает влияния на процесс заряда конденсатора $C_ф$. Так как в момент подачи на вход каскада прямоугольного импульса сопротивление конденсаторов $C_с$ и $C_ф$ весьма мало, то выходное напряжение в основном определится только величиной нагрузки R. По мере заряда конденсатора $C_с$ его сопротивление возрастает, и часть напряжения, приложенного к делителю $R_с$—$C_с$, выделится на этом конденсаторе. Одновременно с этим происходит заряд конденсатора $C_ф$. Его сопротивление при этом также увеличивается, напряжение на нем возрастает, и поэтому на последовательно соединенных сопротивлении R и конденсаторе $C_ф$ увеличивается общее падение напряжения. Таким образом, по мере выделения части выходного напряжения на конденсаторе $C_с$ напряжение, подводимое к делителю $R_с$—$C_с$, тоже повышается, что замедляет спад выходного напряжения. Для правильной компенсации низкочастотных искажений необходимо, чтобы было соблюдено условие

$$C_ф R = C_с R_с.$$

Величина сопротивления $R_ф$, к сожалению, не может быть очень большой, так как через это сопротивление протекает посто-

янная составляющая анодного тока, и чем больше $R_ф$, тем меньше напряжение на аноде лампы. Практически $R_ф$ выбирают в пределах $(2 \div 5)R$. Сопротивление $R_ф$ шунтирует конденсатор $C_ф$, поэтому сопротивление этой ячейки не может увеличиваться беспредельно, а следовательно, и компенсирующее напряжение не может сколь угодно долго следовать за увеличением напряжения на конденсаторе $C_с$ и через определенный промежуток времени увеличение сопротивления конденсатора $C_с$ все же приведет к спаданию выходного напряжения.

Усиливать постоянный ток — это тоже не просто!

Если вы помните, начиная рассказ об импульсных усилителях, мы предупредили, что усиливать импульсы — дело не простое. То же самое можно сказать и теперь, переходя к усилителям постоянного тока.

В чем же трудность?

Мы только что говорили о компенсации низкочастотных искажений. Как вы знаете, при усилении низкочастотных колебаний такой способ компенсации не пригоден. Самое лучшее — вообще отказаться от переходного конденсатора, применив гальваническую связь между каскадами, т. е. соединить выход предыдущего каскада непосредственно с входом последующего. Но в этом случае любое случайное изменение анодного тока лампы, вызванное любым случайным явлением, будь то флуктуации электронной эмиссии, старение деталей, изменение параметров схемы, вызванное колебаниями температуры окружающего воздуха и нагревом деталей, изменение величины питающего напряжения, плохая его фильтрация и т. д., приводит к изменению выходного напряжения усилителя. Эти случайные изменения выходного напряжения искажают форму выходного сигнала. Если же эти явления будут носить длительный, но неустойчивый характер, то, кроме искажения формы сигнала, будет иметь место еще и сползание «нуля», т. е. изменение начального уровня усиления. Поэтому при работе придется все время следить за постоянством уровня усиления и в случае нужды регулировать его. Для автоматических устройств это не очень-то удобное требование. Кроме того, должны быть приняты специальные меры для хорошей вентиляции конструкции усилителя, амортизации ламп входных каскадов и стабилизации питающих напряжений.

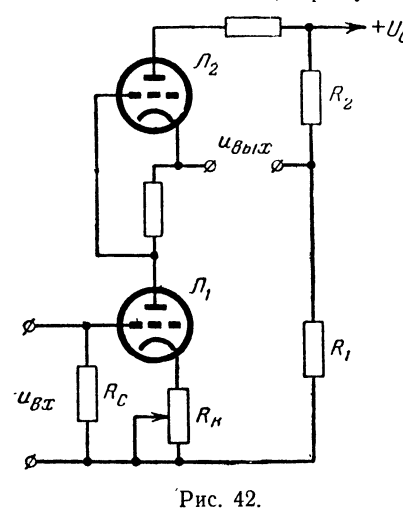


Рис. 42.

Однако в настоящее время разработано большое количество схем менее капризных усилителей постоянного тока с непосредственной связью. Рассмотрим одну из наиболее часто встречающихся — схему последовательного баланса (рис. 42). Это схема уравновешенного моста, состоящего из ламп $Л_1$ и $Л_2$ и двух сопротивлений R_1 и R_2. Выходное напряжение снимается с диагонали моста. Так как сумма внутренних сопротивлений ламп $Л_1$ и $Л_2$ равна сум-

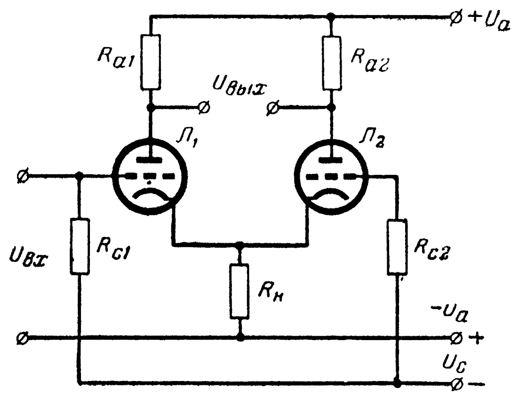


Рис. 43.

ме сопротивлений R_1 и R_2, то при отсутствии входного напряжения $U_{вх}$ схема остается в равновесии даже при изменении напряжения питания. Для балансировки схемы сопротивление $R_к$ должно быть переменным.

Для усиления постоянного тока можно применить и схему параллельного баланса, показанную на рис. 43. Общее катодное сопротивление обеспечивает действие отрицательной обратной связи, охватывающей оба каскада, что значительно уменьшает нелинейные, частотные и фазовые искажения, а также снижает влияние изменений питающего напряжения.

Усилители постоянного тока, так же как усилители низкочастотного напряжения и широкополосные усилители, могут работать на транзисторах по тем же схемам, которые мы только что рассмотрели. Однако с транзисторами сложнее — ведь их параметры очень зависят от температуры. Впрочем, вспомните о методах температурной стабилизации параметров транзисторов. Они позволяют значительно уменьшить температурную зависимость транзисторных схем, и поэтому транзисторные усилители постоянного тока уже начинают широко применяться в автоматических и телемеханических устройствах.

Иногда можно вообще отказаться от усилителя постоянного тока, который по сравнению с усилителем переменного тока нуждается в специальных мерах для стабилизации его работы. Это делается путем преобразования сигнала датчика из постоянного в переменный (например, с помощью вибропреобразователя) и его усиления обычным усилителем переменного тока.

Самый простой усилитель и немного физики

Боюсь, мы так много говорили об электронных усилителях, что вы уже потеряли способность взглянуть на них как бы со стороны и удивиться сложности их схем, подумать о ненадежности (относительной, конечно) и громоздкости их деталей. А об экономичности питания и говорить не приходится: ведь ламповые электронные усилители потребляют очень много электрической энергии, причем непроизводительно расходуют ее на питание нитей накала, требуют специальных высоковольтных устройств для питания анодных цепей. А экономичность питания — это важное условие для работы в устройствах автоматики и телемеханики.

Надо сказать, что современные средства автоматики еще очень неэкономичны. Представьте, что такое «автоматическое устройство» как человек было бы изготовлено современными техническими средствами, т. е. из проводов, ламповых усилителей, электромоторов и прочих технических штуковин. Сколько такое устройство потребляло бы энергии! Не знаю, хватило бы для питания одного такого «человека» Братской ГЭС?

Правда, полупроводниковые устройства потребляют в сотни раз меньше энергии, чем ламповые. Но сейчас еще далеко не все схемы с электронными лампами можно заменить схемами с полупроводниковыми приборами. Кроме того, не забывайте о надежности. Конечно, электронная лампа — вещь хрупкая и к тому же может работать строго ограниченное время, пока не перегорит нить, нагревающая катод, или не иссякнет электронная эмиссия катода. Полупроводниковые приборы значительно долговечнее и менее хрупки, но зато они чрезвычайно чувствительны к повышенным электрическим нагрузкам и изменению температуры. С этой точки зрения они куда менее надежны, чем электронные лампы.

К счастью, есть чрезвычайно простой и надежный способ усиливать постоянный и переменный ток низкой частоты, причем практически до любой мощности. Я говорю о магнитных усилителях.

Это чудесные усилители! Достаточно сказать, что в них нет ни хрупких стеклянных колб с высоким вакуумом, ни накаливающегося катода, ни миниатюрной конструкции транзисторов, они не боятся перегрузок и не требуют обслуживания в процессе работы. А коэффициент усиления у них в одном каскаде может доходить до миллиона.

Вы ждете, что сейчас начнется рассказ об этих замечательных устройствах? Да, я расскажу, но только вначале ...

Ох, уж это «только вначале»! Но как быть иначе? Вы уже сами убедились, что я не зря делаю отступления, приглашаю вас совершить экскурсию то в область электроники, то в импульсную технику, то начну говорить о человеческом мозге. Ничего не поделаешь, ведь современная техника тысячами нитей проникла в самые разнообразные отрасли знаний. В любом техническом устройстве можно найти что-то от физики, что-то от электроники, что-то от химии. В нем сплетутся десятки теорий, сотни законов, открытых совсем недавно и на заре человеческой истории. Вы найдете в этом устройстве элементы, заимствованные у растений, у живого организма, у бешеной силы водопада и безмолвного бега небесных тел. Так не сердитесь за отступления!

Сейчас нам предстоит поговорить о магнетизме. Хотите простой вопрос: что представляет собой магнетизм?

Попробуйте, ответьте! Вам придется многое вспомнить и прежде всего атомное строение вещества. По современным воззрениям главную роль в возникновении магнетизма играет вращение электронов вокруг собственной оси, характеризуемое так называемым спином электронов. Каждый электрон представляет собой как бы элементарный магнитик, направление полюсов которого зависит от направления вращения электрона вокруг собственной оси — от направления спина. Однако для возникновения выраженного магнетизма вещества спины электронов его атомов должны быть направлены в одну и ту же сторону, иначе магнитные моменты электронов будут взаимно компенсироваться и атом в целом будет магнитно нейтральным. И надо заметить, что большинство электронов в атомах имеют взаимно скомпенсированные спины и лишь очень небольшое число электронов имеют некомпенсированные спины.

Но не только наличие электронов с некомпенсированными спинами отличает ферромагнитные вещества, т. е. вещества с ярко выраженными магнитными свойствами, от диамагнитных веществ, т. е. веществ, не обладающих магнитными свойствами. Ведь электронами с некомпенсированными спинами обладают не только ферромагнетики — железо, никель, кобальт и гадолиний, но и марганец, хром, ванадий и многие другие элементы. Для возникновения ферромагнетизма необходимо главным образом взаимодействие электронов с некомпенсированными спинами между собой, причем это взаимодействие проявляется в виде перехода электронов с некомпенсированными спинами из одних атомов в другие. Такие переходы приводят к тому, что электроны с некомпенсированными спинами как бы «коллективизируются». Они уже не принадлежат каким-то определенным атомам в кристаллической решетке вещества. Благодаря этому в некоторых областях кристаллической решетки спины целой группы электронов оказываются направленными одинаково, и такая область, называемая доменом, намагничивается как бы самопроизвольно. Вот именно это характерно для ферромагнетиков, это и определяет их ярко выраженные магнитные свойства.

А теперь давайте мысленно проделаем несколько опытов. Поместим в магнитное поле ферромагнетик, например сердечник обыкновенного трансформатора. Сердечник при этом намагнитится. Проследим, как будет происходить это намагничивание, если магнитное поле изменяется.

При внесении сердечника в магнитное поле в сердечнике появится магнитный поток. Как вы помните, магнитный поток принято изображать магнитными силовыми линиями, число которых характеризует величину потока. Число магнитных силовых линий, приходящееся на единицу площади поперечного сечения сердечника, носит название магнитной индукции B, а сила, с которой магнитное поле действует на магнитную массу, называется напряженностью магнитного поля. Предположим, что напряженность магнитного поля (она обозначается через H), в которое помещен сердечник, изменяется. Когда напряженность магнитного поля равна нулю, т. е. поля нет, магнитная индукция сердечника тоже равна нулю. Начнем увеличивать напряженность поля (рис. 44). Магнитная индукция сердечника также увеличивается, причем вначале

медленно, затем почти скачком и далее опять будет следовать за увеличением напряженности магнитного поля, очень мало повышаясь. Наконец, при некотором значении напряженности магнитного поля H_s магнитная индукция достигнет максимума и почти перестанет возрастать, несмотря на дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля. Такая максимально возможная величина магнитной индукции сердечника B_s называется индукцией насыщения сердечника. Она характеризует его полную намагниченность (насыщение). Сердечник больше не может принять магнитной энергии и не реагирует на дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля.

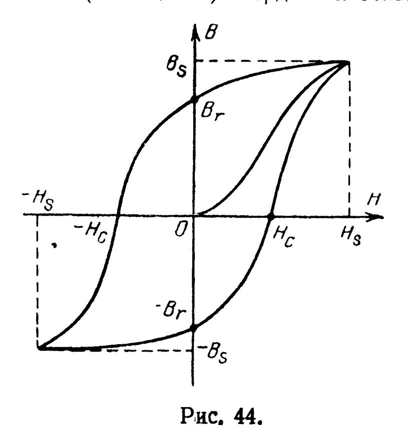


Рис. 44.

Теперь следите внимательно — начинается самое главное! Будем уменьшать напряженность магнитного поля. Магнитная индукция сердечника также начнет уменьшаться, но изменяться она будет уже не так, как до этого возрастала. Выражаясь языком техники, изменение (уменьшение) магнитной индукции сердечника будет происходить по новой кривой, отличной от кривой первоначального намагничивания. Это явление носит название магнитного гистерезиса. Оно вызвано намагниченностью сердечника, который как бы аккумулировал магнитную энергию. Напряженность внешнего магнитного поля может упасть до нуля, а сердечник все же останется намагниченным, обладая магнитной индукцией B_r, которая в этом случае так и будет называться: остаточная магнитная индукция. Чтобы уничтожить эту остаточную намагниченность сердечника — полностью размагнитить сердечник, его надо поместить в магнитное поле обратного направления с напряженностью $-H_c$. Такая величина напряженности размагничивающего поля носит название коэрцитивной силы. Если продолжать увеличивать напряженность магнитного поля в обратном направлении, то при некоторой напряженности поля $-H_s$, численно равной напряженности H_s, сердечник достигнет стадии насыщения с магнитной индукцией $-B_s$, численно равной B_s. Но если теперь вновь изменить напряженность поля от $-H_s$ к нулю, то изменение магнитной индукции сердечника будет происходить опять по новой кривой. При нулевой напряженности внешнего магнитного поля сердечник будет обладать индукцией $-B_r$ остаточной намагниченности, уничтожить которую можно при помощи внешнего магнитного поля с напряженностью H_c.

Наконец, если продолжать увеличивать напряженность более H_c, то индукция сердечника возрастет до значения индукции насыщения B_s, а кривая изменения индукции сердечника замкнется, образовав петлю, называемую петлей гистерезиса.

Вот теперь пора переходить к магнитным усилителям.

Как же он работает, этот «простой» усилитель?

Намотаем на сердечник трансформатора две обмотки. На средний стержень (керн сердечника) поместим обмотку $w_у$ и назовем ее обмоткой управления. Она будет присоединена к источнику постоянного тока с напряжением $u_у$ (рис. 45) На крайние стержни сердечника намотаем обмотку $w_р$ и соединим ее через сопротивление нагрузки $R_н$ с источником переменного тока. Эту обмотку назовем рабочей.

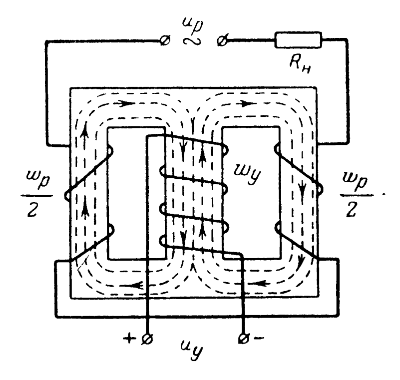


Рис. 45.

Чтобы определить ток в рабочей цепи, надо напряжение этой цепи $u_р$ разделить на сопротивление этой же цепи:

$$i = \frac{u_р}{z}.$$

Заметьте, сопротивление я обозначил через z. Это потому, что полное сопротивление рабочей цепи состоит из активного и индуктивного сопротивлений. Активное сопротивление состоит из сопротивления проводов обмотки, соединяющих проводов и сопротивления нагрузки. Индуктивное же сопротивление возникает в обмотке в результате протекания по ней переменного тока. Поэтому полное сопротивление рабочей цепи равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

где R — (активное (омическое) сопротивление цепи;
ωL — индуктивное сопротивление цепи;
$\omega = 2\pi f$ — угловая частота переменного тока с частотой f;
L — индуктивность рабочей обмотки.

Об индуктивности рабочей обмотки придется поговорить подробнее. Дело в том, что индуктивность рабочей обмотки — не постоянная величина. Она зависит от степени намагниченности сердечника. Если бы вместо сердечника в катушках был воздух, магнитная проницаемость которого равна единице и не зависит от степени намагниченности, то индуктивность рабочей цепи была бы неизменной в процессе работы. Но магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника больше единицы, и самое главное — она зависит от напряженности магнитного поля: при некоторой малой напряженности поля она максимальна, а при увеличении напряженности поля магнитная проницаемость сердечника резко уменьшается и в дальнейшем остается почти неизменной. Вот это обстоятельство — основа работы магнитного усилителя.

Вспомните, что индуктивность и, следовательно, полное сопротивление рабочей цепи, а значит, и ток в ней зависят от величины магнитной проницаемости сердечника. Велика магнитная проницае-

мость сердечника — велики и индуктивность рабочей обмотки, и ее индуктивное и полное сопротивление. А если велико полное сопротивление, то ток в рабочей цепи мал. Если же магнитная проницаемость сердечника мала, то все наоборот, и ток в рабочей цепи значителен. Но магнитная проницаемость сердечника зависит от напряженности магнитного поля. Поэтому, изменяя напряженность поля, можно изменять, а еще лучше сказать — управлять током в рабочей цепи.

Однако как же управлять напряженностью поля?

Посмотрите на рис. 45. На среднем стержне сердечника намотана специальная обмотка управления. Она-то и предназначена для управления напряженностью поля, Достаточно увеличить ток в этой обмотке, как увеличится напряженность магнитного поля, создаваемого этой обмоткой, а следовательно, уменьшится магнитная проницаемость сердечника. А нам это и надо! Когда ток в управляющей цепи мал, напряженность поля также мала, а магнитная проницаемость сердечника велика. Поэтому ток в рабочей цепи невелик. Но достаточно увеличить ток в управляющей цепи, как магнитная проницаемость сердечника резко изменится, и ток в рабочей цепи также резко увеличится.

В страну „магнитную“

Приготовьтесь, пожалуйста, к очередной небольшой экскурсии. Как пишут в приключенческих рассказах, наш путь на этот раз лежит в страну... магнитных материалов.

Вероятно, вы знаете, что все магнитные материалы можно разделить на две группы: магнитно-твердые и магнитно-мягкие. Магнитно-твердые материалы обладают большой коэрцитивной силой. Будучи однажды намагничены, они хорошо сохраняют это состояние. Проще говоря магнитно-твердые материалы — это постоянные магниты. Для работы в магнитных усилителях они совершенно непригодны, так как для их перемагничивания нужно затратить большую энергию. Поэтому обратимся к магнитно-мягким. Они характеризуются небольшой коэрцитивной силой и, как правило, значительной магнитной проницаемостью. К ним относятся, например, листовые электротехнические стали, из которых изготавливают сердечники различных электрических машин и устройств. Пластины сердечника трансформатора, о котором мы до сих пор говорили, изготовлены из такой же стали. Электротехнические стали часто называют кремнистыми, потому что они состоят из сплава железа с 0,5—5% кремния. Они обладают большой индукцией насыщения и поэтому особенно подходят для применения в магнитных усилителях большой мощности, во всяком случае более 5—10 *вт*.

Меньшей индукцией насыщения, но зато значительно большей магнитной проницаемостью обладают так называемые пермаллои — железо-никелевые сплавы, часто имеющие примеси молибдена, хрома, меди, марганца и других металлов. Лучшие марки пермаллоя имеют начальную магнитную проницаемость в 100 раз большую, чем электротехнические стали. Однако у пермаллоев есть и недостатки и, возможно, не менее крупные, чем их достоинства. Прежде всего они очень чувствительны к ударам, давлению, тряске, словом — к механическим нагрузкам. Вот пример: если намо-

тать обмотку непосредственно на сердечнике из молибденового пермаллоя, то возникшие в процессе намотки механические напряжения в сердечнике уменьшат его магнитную проницаемость в несколько раз Поэтому пермаллоевые сердечники помещают в специальные каркасы для защиты от механических нагрузок, их не рекомендуется ударять, сильно стягивать болтами и лишний раз разбирать.

Надо сказать, что у пермаллоев, да и у электротехнических сталей есть очень неприятная особенность: при работе на переменном токе появляется поверхностный эффект. Он заключается в вытеснении магнитного потока из глубины материала на поверхность. Это приводит как бы к уменьшению площади сечения сердечника и одновременно к уменьшению фактической (действующей) магнитной проницаемости, причем этот эффект сказывается тем интенсивнее, чем больше магнитная проницаемость материала. Бороться с поверхностным эффектом можно путем уменьшения толщины пластин сердечника. Для магнитных усилителей пермаллоевые сердечники часто изготавливают, вернее наматывают, из очень тонкой ленты. Так вот, на частотах в тысячи килогерц магнитная проницаемость пермаллоя уменьшается в десять, а то и больше раз по сравнению с величиной на частоте 50 *гц*. В то же время у электротехнических сталей на тех же частотах уменьшение магнитной проницаемости составляет только 10—20%. Словом, пермаллой применим лишь в постоянных магнитных полях, в крайнем случае— на переменном токе низкой частоты.

Сердечники магнитных усилителей, работающих на высоких частотах, изготавливают из оксиферов или, как их еще называют, ферритов. Это магнитодиэлектрики, т. е. они не электропроводны. Заметьте, что и электротехнические стали, и пермаллои являются проводниками электрического тока А вы знаете, что в проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, индуктируются электрические токи. Такие же токи индуктируются и в материале сердечника, и на это расходуется значительная часть магнитной энергии, причем совершенно бесполезно. Иными словами, появление токов в сердечнике (так называемых вихревых токов) равноценно потере части магнитной энергии. Очевидно, что чем выше частота, т. е. чем чаще происходит изменение магнитного поля, тем эти потери значительнее. На высоких частотах они вообще забирают «львиную» долю энергии. Для борьбы с вихревыми токами сердечник разрезают на тонкие пластины и изолируют их друг от друга. Кроме того, увеличивают электрическое сопротивление материала сердечника. Для этого, например, в электротехнические стали и вводят кремний. Ведь чем выше электрическое сопротивление материала, тем «неохотнее» появляются в нем вихревые токи, тем меньше потери магнитной энергии. Вот эти соображения и привели к созданию магнитодиэлектриков. В них магнитные зерна изолированы друг от друга диэлектриком. Поэтому вихревые токи могут возникать лишь в очень небольших по размеру зернах. Тем самым токи эти малы, и потери магнитной энергии в магнитодиэлектриках незначительны даже на очень высоких частотах.

Следует заметить, что существует два вида магнитодиэлектриков: ферриты (или оксиферы) и порошковые магнитодиэлектрики. В порошковых магнитодиэлектриках в качестве магнитного порошка применяют железо-кремний-алюминиевые сплавы (альсиферы), пер-

маллой, а также специальное карбонильное железо. Есть и природный ферромагнетик — минерал магнетит. Ферриты же — это магнитная керамика, т. е неметаллическое вещество, в кристаллической решетке которого вкраплены атомы ферромагнитных материалов. Тем самым ферриты — это магнитные вещества, но неэлектропроводные. Поэтому удельное электрическое сопротивление ферритов в миллионы раз больше, чем металлических ферромагнитных материалов, и потери в них на вихревые токи невелики. В магнитных усилителях они обычно применяются на частотах выше 20 *кгц*. Ферриты не боятся механических нагрузок, а по магнитным свойствам приближаются к пермаллоям, хотя их магнитная проницаемость много меньше лучших марок этого капризного материала.

А как влияет форма сердечника?

Вернемся к магнитным усилителям. Как вы помните (см. рис. 45), обмотка переменного тока (рабочая цепь) намотана на крайних стержнях. Поскольку направления намоток противоположны, в среднем стержне магнитные потоки взаимно уничтожаются. Поэтому в управляющей обмотке, намотанной на среднем стержне, не индуктируется переменный ток из рабочей цепи.

Так происходит в магнитных усилителях с трехстержневыми сердечниками. Но в магнитных усилителях, особенно работающих на повышенных частотах, часто применяют двухстержневые сердечники,

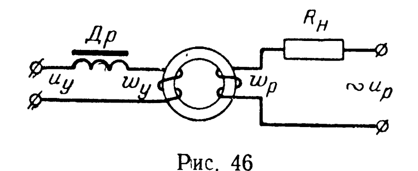


Рис. 46

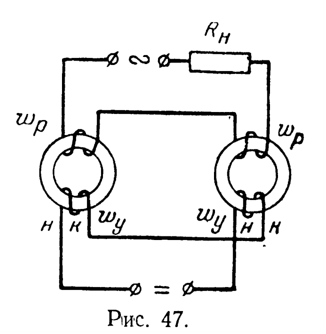


Рис. 47.

обычно имеющие форму тора — кольца, причем сердечник либо наматывают из тонкой ленты, например пермаллоевой, либо изготавливают из феррита. Однако если просто заменить трехстержневой сердечник двухстержневым (а кольцевой сердечник — это и есть двухстержневой), у которого на одном стержне намотана управляющая, а на другом—рабочая обмотка, то в управляющей цепи будет наводиться переменный ток из рабочей цепи, и работа усилителя нарушится. Поэтому применить в усилителе двухстержневой сердечник можно только в том случае, если включить в цепь управления большую индуктивность (рис. 46), проще говоря, дроссель. Как вы знаете, индуктивность препятствует протеканию в цепи, в которую она включена, переменного тока: для него она представляет большое индуктивное сопротивление.

Можно построить магнитный усилитель и на двух тороидальных сердечниках. При этом значительно улучшится линейность

зависимости тока в рабочей цепи (на выходе усилителя) от величины сигнала в управляющей цепи (на его входе). Кроме того, при этом может быть уменьшена минимально необходимая амплитуда управляющего сигнала, т. е повышена чувствительность усилителя. Чтобы в усилителях с двумя тороидальными сердечниками в управляющей цепи не индуктировался переменный ток из рабочей цепи, управляющие обмотки включают навстречу друг другу (рис. 47). В результате индуктированные в них э. д. с. переменного тока взаимно уничтожаются.

Чем отличаются мечты от действительности

Если вы внимательно читаете эту книгу, то уже заметили, что вначале рассказывается о каком-нибудь совершенно идеальном усилителе или датчике, электронной лампе или транзисторе, а потом оказывается, что таких чрезвычайно послушных, без капризов и отклонений в работе устройств вообще не существует. Такие идеализированные устройства — это выдумки. Но они нужны для того, чтобы просто, ясно, без усложнений объяснить основной принцип работы реальных устройств.

Вспомните, говоря о работе магнитного усилителя, мы как-то само собой приняли, что как только в цепи управления появляется сигнал, в рабочей цепи немедленно изменяется ток, т. е. сигнал управления немедленно передается в рабочую цепь (на выход усилителя), но уже в усиленном виде. Заметьте: немедленно, мгновенно! Но на самом деле это происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием. Проще говоря, усилителю нужен некоторый промежуток времени на усиление сигнала. Пусть этот промежуток времени небольшой, всего доли секунды, но во многих устройствах автоматики он совершенно недопустим.

Магнитный усилитель срабатывает немгновенно потому, что его обмотка управления обладает индуктивностью. Ток в индуктивности не может измениться мгновенно (по тем же причинам, по каким не может мгновенно измениться напряжение на конденсаторе — см. стр. 48). Поэтому на прохождение тока через индуктивность требуется некоторое время. Оно-то и определяет «инерционность» магнитного усилителя — время запаздывания между появлением напряжения входного сигнала и соответствующего ему выходного сигнала.

Впрочем, мы до сих пор все время говорили, что в обмотке управления проходит постоянный ток. Даже принимали особые меры, чтобы исключить переменную э. д. с, наводимую в цепи управления рабочей обмоткой Все это так, но ведь нас интересуют главным образом те моменты, когда в управляющей обмотке проходит изменяющийся ток управления. Именно в эти моменты автоматическое устройство срабатывает, т. е. реагирует на изменение внешних условий и вырабатывает ответные сигналы управления. В это время от магнитного усилителя и требуется быстрота срабатывания. А как раз в такие моменты ток в управляющей цепи изменяющийся. Но всякое изменение тока вызывает изменение магнитного поля катушки. Следовательно, вступает в действие индуктивность обмотки управления, препятствующая изменению тока в ее цепи.

Так вот, возвращаясь к тем усилителям, схемы которых мы

рассматривали, надо сказать, что они обладают значительным временем запаздывания, доходящим до нескольких секунд. Однако не разочаровывайтесь в магнитных усилителях — есть способ значительно уменьшить их запаздывание! Для этого в усилитель надо ввести обратную связь, т. е. изменение выходного тока должно воздействовать на вход усилителя. Предположите, что в цепи управления появился сигнал. Начальное изменение тока в этой цепи вызвало некоторое изменение тока в рабочей цепи. Схема усилителя с обратной связью построена таким образом, что ток рабочей цепи проходит, кроме всего прочего, еще и по специальным обмоткам обратной связи (рис. 48), причем предварительно он выпрямляется. Поэтому через обмотки обратной связи он проходит всегда в одном направлении.

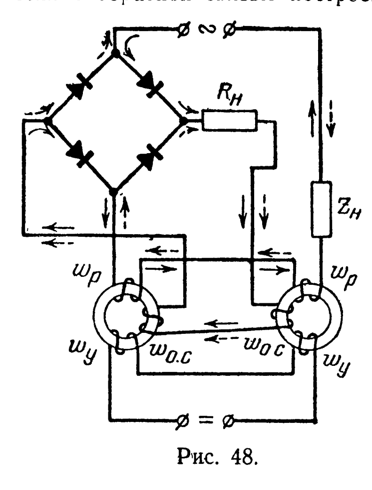


Рис. 48.

Прохождение изменившегося тока рабочей цепи через обмотки обратной связи приводит к изменению магнитной проницаемости сердечника и тем самым — к дальнейшему, еще большему изменению тока в рабочей цепи. Получается, что благодаря обратной связи рабочий ток помогает управлять собой току в цепи управления. Иными словами, рабочий ток изменяется не только от изменения управляющего тока, но и от собственного изменения. Естественно, что благодаря этому изменение тока в рабочей цепи происходит быстрее и много интенсивнее, чем от действия одного тока управления. Это равносильно тому, как если бы увеличилась крутизна изменения магнитной проницаемости сердечника. Но так как нас интересует не изменение магнитной проницаемости само по себе, а отражение этого изменения на работе усилителя, то можно сказать, что в результате действия обратной связи увеличивается коэффициент усиления магнитного усилителя: маленькое изменение управляющего тока вызывает значительное изменение рабочего тока.

На первый взгляд может показаться, что все это не имеет отношения к уменьшению времени запаздывания. Однако это не так. Предположите, что нужно сделать магнитный усилитель с заданным коэффициентом усиления. В усилителе без обратной связи для получения такого коэффициента потребуется намотать обмотку управления с определенным числом витков, и при этом она будет обладать определенной индуктивностью. В усилител же с обратной связью для получения такого же коэффициента усиления можно намотать обмотку управления с меньшим количеством витков, потому что действию цепи управления будет помогать цепь обратной связи. Но чем меньше число витков обмотки управления, тем меньше ее индуктивность, а следовательно, меньше и задержка управляющего сигнала в этой цепи. Значит, у усилителя с обратной

связью время запаздывания меньше. Замечу, что во многих магнитных усилителях с помощью обратной связи удается уменьшить время запаздывания более чем в 100 раз по сравнению с усилителями с таким же коэффициентом усиления, но без обратной связи.

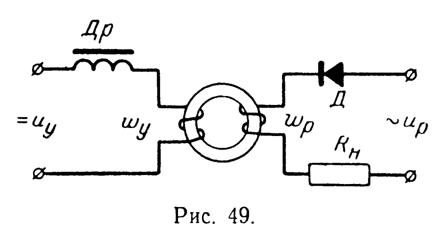


Рис. 49.

А теперь вспомните схему магнитного усилителя на торообразном сердечнике (рис. 46). Если включить в цепь рабочей обмотки однополупериодный выпрямитель *Д*, то получится схема простейшего магнитного усилителя с внутренней обратной связью (рис. 49). Давайте проследим, как отразится включение выпрямителя, например, полупроводникового диода, на работе усилителя.

Прежде всего по рабочей обмотке будет протекать уже не переменный, а пульсирующий ток, который состоит как бы из двух токов: переменного и постоянного, а точнее, переменной и постоянной составляющих. Заметьте, благодаря включению диода по рабочей обмотке проходит постоянный ток, величина которого, естественно, будет зависеть от силы тока в рабочей цепи. Изменение управляющего тока приводит к изменению величины пульсирующего тока. А это значит, что изменится и величина постоянной составляющей, проходящей по рабочей обмотке и воздействующей на магнитное состояние сердечника точно так же, как это было в схеме усилителя с внешней обратной связью. Таким образом, даже при отсутствии управляющего напряжения проходящий через рабочую обмотку пульсирующий ток своей постоянной составляющей стремится насытить сердечник, и ток на выходе усилителя при отсутствии управляющего сигнала близок к максимальному.

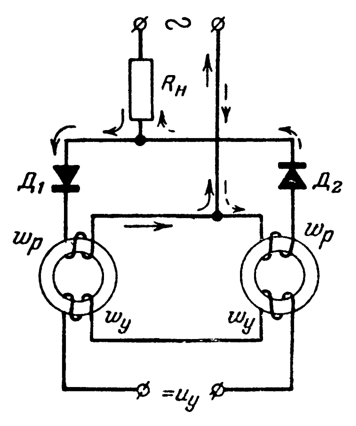


Рис. 50.

Схема усилителя на рис. 49 называется однополупериодной, так как в ней через нагрузку проходит пульсирующий однополупериодный ток. В моменты, когда ток через диод не проходит, нагрузка как бы отключена от питающего напряжения. Однако питать нагрузку таким током не всегда удобно, поэтому чаще применяют двухполупериодные усилители с внутренней обратной связью (рис. 50). Как видно из схемы такого усилителя, через нагрузку $R_н$ проходит переменный ток, а по рабочей обмотке — пульсирующий, но уже двухполупериодный, т. е. ток проходит в одном направлении, но в оба полупериода питающего переменного тока.

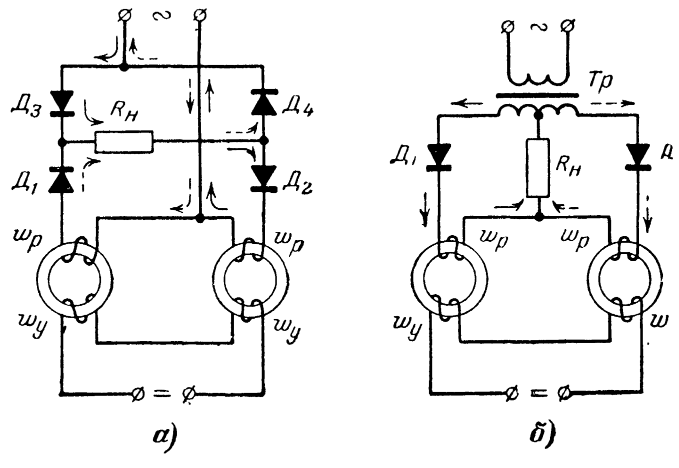


Рис 51.

Можно составить схему и таким образом, чтобы через нагрузку проходил постоянный ток. Но для этого нужен либо специальный выпрямитель (рис. 51,*а*), либо выход усилителя придется сделать трансформаторным (рис. 51,*б*).

РЕЛЕ

Какие они — реле?

В автоматических и телемеханических устройствах реле играют роль электронных мышц, переключая электрические цепи, а также органов памяти, когда им приказывают помнить, при каких включенных электрических цепях какие цепи должны быть выключены Наконец, реле могут служить усилителями: реле срабатывает от маленького сигнала, а своими контактами включает в электрическую цепь мощный источник электрического тока. (Кстати, усилитель тоже может работать в качестве реле — см. стр. 78). Но вне зависимости от назначения суть работы реле в том, чтобы при определенном изменении электрического сигнала произвести вполне определенное включение, выключение или переключение электрических цепей.

По принципу действия реле, применяемые в автоматике и телемеханике, подразделяются на два больших класса: электромеханические и электронные Первые, как следует из самого названия, преобразуют входной (или управляющий) электрический сигнал в механическое действие, результатом которого является необходимое переключение контактов. Реле электронного типа работают на другом принципе: это бесконтактные электронные устройства, у которых при поступлении на вход управляющего сигнала происходит

как бы изменение внутреннего состояния, в результате чего они резко уменьшают или увеличивают свое электрическое сопротивление. Подробнее об электронных реле мы расскажем позднее, а сейчас поговорим об электромеханических реле, чрезвычайно широко распространенных в автоматике и телемеханике. В зависимости от принципа, положенного в основу их работы, они могут быть электромагнитными (постоянного или переменного тока), магнитоэлектрическими, электродинамическими, индукционными и электротермическими.

Нейтральные электромагнитные

Электромагнитные реле применяют для переключения сравнительно мощных цепей токов. Подразделяются они на нейтральные и поляризованные. Для первых направление управляющего тока в обмотке не имеет значения. Поляризованные же реле различают направление управляющего тока, т. е. они в зависимости от направления тока в обмотке замыкают различные группы контактов.

Нейтральное электромагнитное реле содержит (рис. 52,*а*) неподвижный сердечник с обмоткой и подвижный якорь из магнитно-мягкого материала Если по обмотке сердечника пропустить ток, то сердечник притянет якорь, который при повороте, упираясь в соответствующие выступы, замкнет или разомкнет контакты. При выключении управляющего тока якорь под действием пружины вернется в исходное положение, произведя обратное выключение или включение контактов.

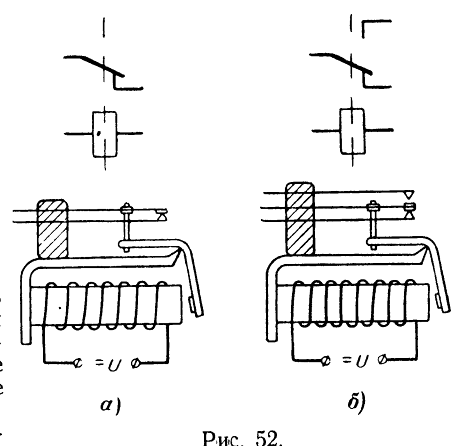


Рис. 52.

Конструктивно электромагнитные реле могут быть выполненны по-разному, но наибольшее распространение получили так называемые реле с поворотным якорем, к которым относятся широко распространенные телефонные и кодовые реле. На реле может быть установлено различное число контактов. Кроме того, контакты могут объединяться в группы. Тогда в исходном положении якоря одни контакты разомкнуты, а другие замкнуты. При включении реле и повороте якоря первые контакты замыкаются, а вторые размыкаются. Контакты можно установить и таким образом, что реле будет служить переключателем (рис. 52,*б*). Всего на реле можно установить до 25 контактных пружин.

Надо сказать, что контакты — это, пожалуй, наиболее ответственная часть реле. Они должны надежно, без дребезжания замыкать и размыкать цепи и при этом не обгорать, так как иначе

резко возрастет их переходное сопротивление Обгорание контактов происходит потому, что в момент размыкания между контактами образуется электрическая дуга, которая оплавляет их. Особенно благоприятны условия для образования дуги при разрыве цепи постоянного тока, да если к тому же в эту цепь включена индуктивность. Образуется дуга и при разрыве цепи переменного тока, но она «менее эффективна», так как она гаснет при каждом переходе значения переменного тока через нуль, и продолжительность действия дуги невелика. Поэтому те же контакты на переменном токе могут разрывать в 3—4 раза бо́льшую мощность, чем на постоянном.



Рис. 53.

Для устранения дуги (или хотя бы уменьшения ее) часто применяют так называемую схему искрогашения (рис. 53). В момент размыкания или замыкания контакта происходит заряд или разряд конденсатора C через сопротивление R, и напряжение между контактами уменьшается

Очень большое значение имеет материал, из которого изготовлены контакты. Материал должен, во-первых, обеспечивать малое переходное сопротивление контакта, а во-вторых, быть стойким к электрической дуге, т. е. как можно меньше оплавляться. Контакты малой мощности изготавливают из серебра, платины, платино-иридиевого сплава, сплава серебра с золотом, никелем и другими металлами. Более мощные контакты изготавливают из вольфрама и его сплавов с серебром. Наконец, контакты большой мощности изготавливают из красной меди и графита.

В зависимости от числа контактов и их размеров для срабатывания реле требуется определенная электрическая мощность. Для срабатывания маломощных реле она может быть порядка 0,01 *вт* и даже меньше, у больших реле 3—4 *вт*. Мощность, или сила тока, необходимая для срабатывания реле, зависит, с одной стороны, от противодействующего усилия пружин контактов и их веса, необходимого давления контактов, трения при повороте якоря и пр., а с другой стороны — от количества витков провода в обмотке. Произведение силы тока на число витков провода в обмотке (число ампер-витков), при котором создается магнитное усилие, способное притянуть якорь к сердечнику, называется ампер-витками срабатывания: $Aw_{ср}$. Это очень важный параметр, характеризующий силу тока, необходимую для срабатывания реле.

Если после срабатывания реле уменьшить силу тока, то отпускание якоря призойдет не сразу, а только после уменьшения тока до определенного значения. Ампер-витки, соответствующие такой силе тока, называются ампер-витками отпускания: $Aw_{отп}$. Таким образом, коэффициент возврата $K_в$ реле меньше единицы:

$$K_в = \frac{Aw_{отп}}{Aw_{ср}} < 1.$$

Это связано с тем, что для притягивания якоря к сердечнику требуется бо́льшее усилие, чем для удержания якоря в притяну-

том состоянии (в основном потому, что в исходном положении якорь находится на некотором расстоянии от сердечника и для его притягивания надо совершить определенную работу, что не требуется для удержания якоря в притянутом состоянии; но есть и другие причины, о которых сейчас я говорить не буду). В различных конструкциях реле коэффициент возврата составляет 0,2—0,95.

Замечу, что для надежной работы реле ампер-витки срабатывания обычно выбирают в 3—4 раза больше теоретических:

$$Aw_{\text{раб}} = (3 \div 4) Aw_{\text{ср}}.$$

Очень важный параметр реле — время срабатывания или, правильнее сказать, длительность срабатывания. В некоторых системах автоматики и телемеханики реле должно замыкать или размыкать контакты как можно быстрее после получения управляющего импульса. В таких системах длительность срабатывания (а также отпускания) должна исчисляться миллисекундами (тысячными долями секунд). В других же системах, наоборот, время срабатывания должно быть большим — до нескольких секунд. В таких случаях принимают специальные меры для увеличения времени срабатывания реле.

Какие же факторы влияют на длительность срабатывания и отпускания реле? Их много, но основной из них — наличие у реле обмотки, которая обладает индуктивностью. Мы уже не раз говорили, что индуктивность препятствует мгновенному изменению (или, что то же, появлению) тока. Поэтому после включения реле ток в обмотке возрастает не мгновенно, а постепенно, т. е. току требуется некоторое время, чтобы возрасти до значения, при котором количество ампер-витков станет достаточным для срабатывания реле. При выключении реле происходит обратный процесс: после выключения ток в обмотке исчезает не сразу, а постепенно спадает, и поэтому проходит некоторое время, в течение которого ампер-витки уменьшаются до значения, соответствующего отпусканию якоря.

Замедление работы реле можно осуществить механическими или электрическими способами. Первые заключаются в том, что движение якоря замедляется при помощи пневматического, гидравлического или механического тормоза. Электрические же способы предусматривают замедление спадания или нарастания магнитного потока в сердечнике. Для этого обмотку реле шунтируют емкостью или вводят в нее короткозамкнутые витки. Впрочем, вместо короткозамкнутых витков чаще применяют магнитный шунт: на сердечник надевают медную гильзу. При включении и выключении реле в гильзе возникает э. д. с. и появляется ток, вызывающий магнитный поток такого направления, что скорость изменения результирующего магнитного потока, воздействующего на якорь, уменьшается. Электрические методы позволяют замедлить работу реле до 0,5—1 *сек*, механические — до десятков секунд.

Если необходимо, чтобы реле различало направление тока в обмотке, т. е полярность управляющего тока, то, как я уже говорил, применяют поляризованные реле.

Поляризованные

Поляризованные электромагнитные реле, так же как и нейтральные электромагнитные реле, имеют неподвижный сердечник и подвижный якорь. Но, кроме того, в них имеется постоянный магнит, который поляризует реле, позволяя ему различать направление управляющего тока.

Возможны три принципиальные схемы поляризованного реле (рис. 54). При первой якорь расположен внутри неподвижной обмотки. В зависимости от полярности тока в этой обмотке якорь намагничивается в том или ином направлении и притягивается

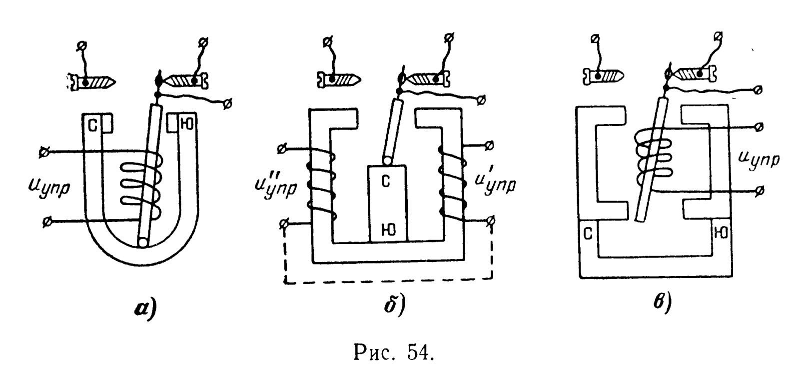


Рис. 54.

к соответствующему полюсу подковообразного постоянного магнита, замыкая при одном направлении тока левый контакт, а при другом — правый контакт.

Во второй схеме один из полюсов постоянного магнита при помощи магнитопровода превращается в два башмака, на которые надеты две отдельные обмотки, соединенные последовательно. Поэтому при одном направлении тока магнитное поле, например, левого башмака усилится, а правого уменьшится, и якорь притянется к левому башмаку, замкнув при этом левый контакт. При обратном направлении тока все произойдет наоборот.

Третья схема поляризованного реле внешне напоминает первую. Здесь на каждый полюс постоянного магнита надет башмак, но башмаки выполнены таким образом, что образуют мостовую магнитную цепь. В зависимости от направления тока в неподвижной обмотке якорь поворачивается, притягиваясь одним концом например, к левому башмаку, а другим к правому. При этом он замкнет правый контакт, а при перемене направления тока в обмотке — левый контакт.

Во всех рассмотренных схемах реле имеет две позиции: замкнут один контакт или другой, причем контакт остается замкнутым и после прекращения управляющего тока Поэтому реле в следующий раз реагирует только на ток противоположного направления, вызывающего переключение контактов. Однако поляризованное реле можно отрегулировать таким образом, что после прекращения тока

якорь будет возвращаться всегда в одно и то же положение, замкнув при этом соответствующий контакт. Реле с такой регулировкой называется «двухпозиционным поляризованным реле с преобладанием». По характеру работы оно напоминает нейтральное электромагнитное реле, но отличается от него тем, что переключение контактов происходит только при определенном направлении управляющего тока. Это очень ценное свойство поляризованных реле.

Поляризованное реле может быть и трехпозиционным. Для этого в реле должна быть специальная пружина, возвращающая якорь в среднее положение при отсутствии управляющего тока. В таком положении оба контакта разомкнуты, поэтому реле способно реагировать на управляющий ток любого направления и в зависимости от направления замыкать соответствующий контакт.

Чувствительность поляризованных реле очень высока. Для их работы требуется всего несколько ампер-витков, а время срабатывания составляет 2—5 *мсек.*

А могут ли электромагнитные реле работать на переменном токе? Ведь не всегда удобно питать обмотку реле постоянным током, часто значительно выгоднее использовать для этого переменный ток, например, от осветительной сети.

Да, могут работать и на переменном токе, но для этого электромагнитные реле должны быть особой конструкции. Попробуйте включить в цепь переменного тока обычное электромагнитное реле: якорь реле начнет вибрировать, так как переменный ток 2 раза за период спадает до нуля, и в эти моменты якорь будет отходить от сердечника (а вернее, даже раньше, как только ампер-витки будут проходить через значения срабатывания и отпускания) Чтобы устранить вибрацию якоря, электромагнитное реле переменного тока конструируют таким образом, что на якорь действуют два магнитных потока, но сдвинутые во времени один относительно другого, т. е. сдвинутые по фазе. Поэтому тяговое усилие сердечника никогда не падает до нуля даже в те моменты, когда ток в обмотке спадает до нуля. Такие сдвинутые по фазе магнитные потоки можно получить, если конец сердечника реле раздвоить и на одну половину надеть медное кольцо В кольце будет наводиться э. д. с. и возникнет ток. Этот ток создаст в сердечнике свой магнитный поток, который, как и основной магнитный поток сердечника, притягивает якорь к сердечнику. Но все дело в том, что ток, наводимый в кольце, действует не в такт с током, проходящим через обмотку реле (вспомните о явлении магнитного гистерезиса!). Поэтому и магнитный поток, создаваемый этим током, оказывается сдвинутым во времени относительно основного магнитного потока сердечника.

Существуют и другие, более сложные конструкции электромагнитных реле переменного тока

Еще несколько реле

Магнитоэлектрические реле по конструкции и принципу действия напоминают известные магнитоэлектрические измерительные приборы, которые применяются в авометрах и других измерительных устройствах. Принцип действия реле заключается в том, что при прохождении тока через рамку, находящуюся в поле постоян-

ного магнита, она поворачивается (рис 55). На рычаге, скрепленном рамкой, находится подвижный контакт, который в зависимости от направления тока в рамке замыкается с неподвижным правым или левым контактом. Когда же ток в рамке отсутствует, рычаг под действием двух спиральных пружин возвращается в среднее положение.

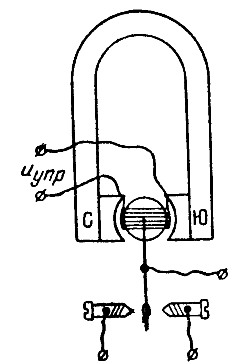


Рис. 55.

Чувствительность магнитоэлектрических реле очень высока, до 10^{-10} *вт*. Это самые чувствительные из всех электромеханических реле. Однако давление на контактах магнитоэлектрического реле невелико, и поэтому реле может управлять электрической мощностью всего в несколько ватт. Чтобы увеличить переключаемую мощность, реле снабжают блокировочным устройством (рис. 56): двумя миниатюрными электромагнитами, обмотки которых автоматически включаются при замыкании контактов реле. Включенный электромагнит притягивает рычаг рамки и тем самым увеличивает контактное давление во много раз, создавая надежный контакт. Однако прекращение тока в рамке реле в этом случае не вызывает размыкания контактов реле; для этого необходимо дополнительное размыкание цепи блокировки.

Большим недостатком магнитоэлектрических реле является их медленное срабатывание: длительность срабатывания составляет 0,1—0,5 *сек*.

Электродинамические реле по принципу действия сходны с магнитоэлектрическими, но у них магнитный поток создается обмотками возбуждения, надетыми на магнитопровод (рис. 57). Мощность, требуемая для срабатывания электродинамических реле, порядка 10^{-3}—1 *вт* и даже более. В этом отношении они не имеют преимуществ перед магнитоэлектрическими или электромагнитными ре-

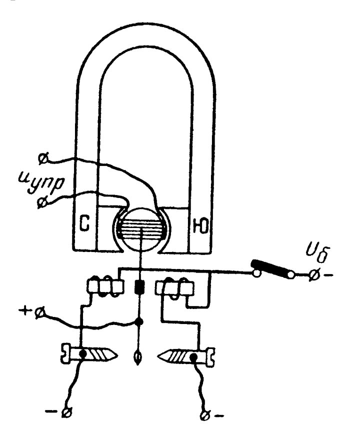


Рис. 56.

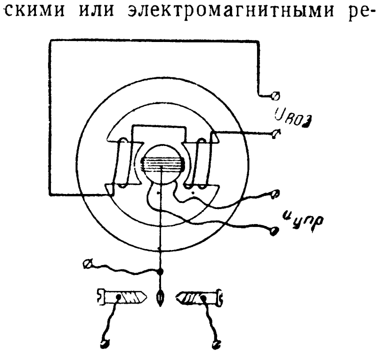
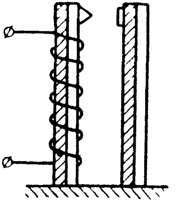


Рис. 57.

ле. Правда, длительность их срабатывания не более 100 *мсек*, а управляемая электрическая мощность 50 *вт* и выше, но потребность в отдельном источнике питания обмоток возбуждения сводит на нет эти положительные качества электродинамических реле при работе на постоянном токе.

Но при использовании на переменном токе электродинамические реле обладают очень ценным для автоматики свойством: способностью реагировать на величину фазового сдвига между током в обмотке возбуждения и током в рамке. Например, если ток в рамке сдвинут на 90° по отношению к току в обмотке возбуждения, то рамка под действием пружин будет находиться в среднем положении и контакты останутся разомкнутыми. Но как только сдвиг токов изменится, замкнется тот или иной контакт в зависиости от знака угла сдвига фаз, т. е. в зависимости от того, больше или меньше 90° стал угол сдвига.


Рис. 58.

В автоматике часто применяют *электротермические реле,* которые по принципу действия напоминают термоэлектрические датчики. Работа их основана на расширении твердого тела, жидкости или газа при нагревании их электрическим током, в результате чего происходит механическое перемещение и связанное с этим замыкание или размыкание контактов. Конструкции таких реле весьма разнообразны. Наибольшее распространение получили так называемые биметаллические реле. Основная часть в них — биметаллическая пластинка, состоящая из двух металлов (рис. 58), имеющих разный коэффициент линейного расширения. На пластинку надета обмотка, по которой проходит управляющий ток. Ток нагревает обмотку и биметаллическую пластинку. Вследствие различного удлинения слоев металлов пластинки она изгибается и контакты замыкаются.

Мощность, необходимая для срабатывания биметаллического реле, не менее нескольких ватт, а минимальное время срабатывания — десятые доли секунды.

Надо заметить, что биметаллическое реле обладает большой тепловой инерцией, поэтому его можно применять в качестве простейшего реле времени со временем срабатывания до 10 *мин.*

Естественно, что на работу электротермического реле большое влияние оказывает температура окружающей среды. При повышении температуры срабатывание происходит быстрее и при меньшем управляющем токе, а при понижении температуры — наоборот. Чтобы снизить влияние температуры окружающей среды, второй контакт биметаллического реле устанавливают на такой же пластинке, как и первый. Тогда при изменении температуры окружающей среды пластинки обоих контактов отклоняются одинаково и работа реле не нарушается.

Между прочим, обычный плавкий предохранитель, который применяется в радиоприемниках, а также предохранительные пробки по существу представляют собой электротермическое реле. В самом деле, при увеличении тока сверх установленного значения плавкая вставка в предохранителях расплавляется и происходит размыкание цепи, т е. срабатывает реле.

Электроны вместо контактов

Во многих автоматических и телемеханических устройствах, а особенно в вычислительной технике к реле предъявляются очень жесткие требования в отношении длительности срабатывания. И не редкость, что длительность срабатывания должна составлять всего несколько микросекунд (миллионных долей секунды!), а мощность, необходимая для срабатывания реле,—порядка 10^{-6} *вт*, т. е. миллионных долей ватта

С такими требованиями электромеханические реле уже не могут справиться Подобным быстродействием и исключительно малой потребляемой мощностью отличаются электронные реле.

Электронные реле, как и электромеханические, могут быть одно- или двухпозиционными Кроме того, они могут реагировать на направление управляющего тока или напряжения. Преимущество электронных реле перед электромеханическими — в отсутствии механических контактов и подвижных переключающих частей. Их роль выполняют электронные потоки. Именно поэтому электронные реле практически безынерционны и обладают исключительным быстродействием при очень малой потребляемой мощности.

Чтобы понять, как работает электронное реле, рассмотрим схему простейшего двухкаскадного реостатного усилителя без переходных конденсаторов (рис. 59,*а*). Зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ от входного напряжения $U_{вх}$ усилителя показана на рис. 59,*б*. При большом отрицательном напряжении $u_{вх}$ (участок *АБ*), лампа $Л_1$ заперта, и напряжение ее на аноде равно напряжению источника питания U_a Напряжение на сетке лампы $Л_2$ превышает отрицательное напряжение смещения, и эта лампа открыта. Напряжение на ее аноде минимально и определяется разностью $U_a—i_{a2}R_{a2}$. Когда нарастающее напряжение $u_{вх}$ достигнет потенциала отпирания лампы $Л_1$ (точка *Б*), лампа откроется. При этом напряжение на ее аноде уменьшится, что вызовет уменьшение положительного напряжения на сетке лампы $Л_2$ и увеличение напряжения на ее аноде; выходное напряжение $u_{вых}$ при этом также увеличится (участок *БВ*). Наконец, напряжение на аноде лампы $Л_1$, а следовательно, и на сетке лампы $Л_2$ уменьшится настолько, что лампа $Л_2$ закроется (*В* — точка запирания лампы $Л_2$) Теперь увеличение входного напряжения $u_{вх}$ на сетке лампы $Л_1$ уже не будет влиять на напряжение на аноде лампы $Л_2$, а значит, и на выходное напряжение $u_{вых}$ (участок *ВГ*).

Соединим точку *1* схемы с сеткой лампы $Л_1$, т. е. введем положительную обратную связь. Теперь при увеличении входного напряжения описанный выше процесс отпирания лампы $Л_1$ и запирания лампы $Л_2$ произойдет чрезвычайно быстро. Действительно, увеличение входного напряжения (после точки *Б* характеристики) приведет к уменьшению напряжения на аноде лампы $Л_1$ и, следовательно, к увеличению напряжения на аноде лампы $Л_2$, т. е. к дополнительному уменьшению отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_1$. Это в свою очередь вызывает дальнейшее уменьшение напряжения на аноде лампы $Л_1$ и увеличение напряжения на аноде лампы $Л_2$ и т. д. Возникает как бы цепная реакция, в результате которой схема переходит в новое состояние, при котором лампа $Л_1$ открывается, а лампа $Л_2$ закрывается.

Однако цепная реакция возникает в схеме не при любых условиях Рассмотрим состояния, в которых находится спусковое устройство (ибо это уже не просто усилитель, а именно спусковое устройство!) в процессе работы.

В первом из них лампа $Л_1$ закрыта, а лампа $Л_2$ открыта. В таком состоянии устройство находится в выбранном нами исходном

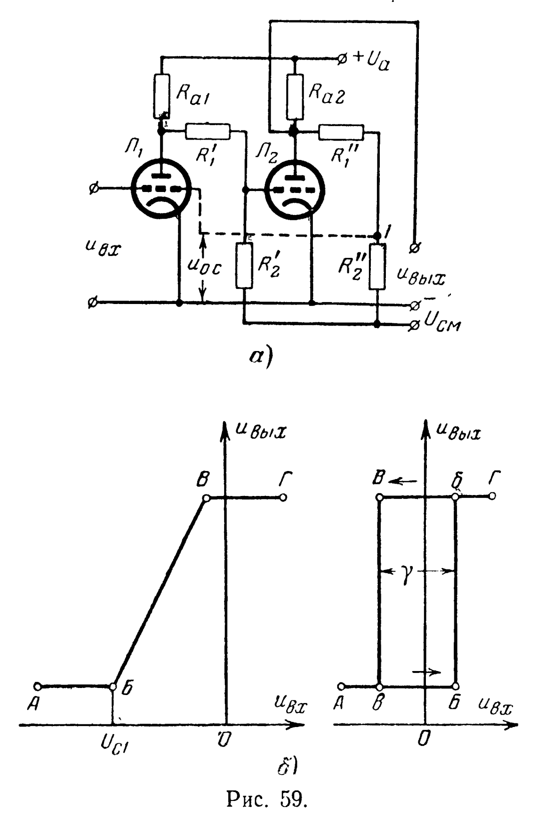


Рис. 59.

положении. Оно будет устойчивым, так как при отсутствии входного напряжения устройство может находиться в нем сколько угодно долго.

Устройство может находиться и в другом устойчивом состоянии, в котором лампа $Л_1$ открыта, а лампа $Л_2$ закрыта. Оно может быть выведено из этого состояния, например, подачей на сетку лампы $Л_1$ отрицательного входного, или, лучше сказать, запускающего напряжения.

Наконец, возможно третье состояние, в котором устройство находится в момент перехода из одного устойчивого состояния

в другое. В этом состоянии обе лампы открыты, и такое состояние неустойчиво.

Какая разница между этими состояниями с точки зрения изменения напряжений и токов в цепях схемы?

Устойчивое состояние должно быть таким, чтобы любые случайные изменения токов и напряжений в схеме не могли вывести устройство из этого состояния. В реальной схеме случайные изменения токов и напряжений всегда существуют из-за флуктуационных процессов, изменения питающего напряжения и т. д. Устройство останется в устойчивом состоянии только при том условии, что эти изменения не повлекут за собой еще больших изменений токов и напряжений в схеме. Предположим, что напряжение на сетке лампы $Л_1$ по каким-то случайным причинам изменилось. Это вызовет изменение выходного напряжения, а значит, и напряжения обратной связи $u_{о.с}$, подаваемого на сетку лампы $Л_1$. Это изменение может быть либо больше изменения напряжения на сетке лампы $Л_1$, которое его вызвало, либо меньше его в зависимости от общего коэффициента усиления K (от входа до выхода цепи обратной связи). Если K больше единицы, то система будет неустойчивой: случайный процесс будет развиваться, нарастая лавинообразно. Если же K меньше единицы, то система будет устойчивой: случайный процесс затухает.

В практических схемах, когда обе лампы находятся в открытом состоянии, коэффициент K много больше единицы. Это приводит к резким (скачкообразным) переходам устройства из одного равновесного состояния, в другое, как только одна из ламп будет открыта каким-либо внешним сигналом.

Предположим, что лампа $Л_1$ заперта, а лампа $Л_2$ открыта (точка $А$ на рис. 59,*б*). Чтобы перевести устройство из этого устойчивого состояния в другое устойчивое состояние, надо на сетку лампы $Л_1$ подать запускающий положительный импульс $u_{зап}$ такой величины, чтобы напряжение на сетке лампы стало меньше потенциала запирания. При достижении такого положения (точка $Б$) устройство скачком перейдет в новое устойчивое состояние (точка *б*), характеризуемое верхней ветвью $ВГ$ характеристики.

Чтобы теперь вернуть устройство в нижнее устойчивое состояние, характеризуемое ветвью $АБ$, надо на сетку лампы $Л_1$ подать отрицательный импульс, после чего устройство скачком перейдет в точку *в* характеристики. Однако для этого вовсе нет необходимости, чтобы отрицательный запускающий импульс имел амплитуду, равную потенциалу запирания лампы, так как даже небольшое уменьшение напряжения на сетке этой лампы приведет к значительному увеличению напряжения на ее аноде, а значит, и к увеличению напряжения на сетке лампы $Л_2$, в результате чего эта лампа откроется, разовьется цепная реакция и устройство «опрокинется» в прежнее устойчивое состояние. (Отрицательный запускающий импульс может быть в 2—3 раза меньше $U_{со}$.) Таким образом, к отрицательным запускающим импульсам устройство более чувствительно.

Из рис. 59,*б* видно, что при непрерывном изменении запускающего напряжения выходное напряжение изменяется скачками. Скачки происходят при прохождении запускающим напряжением пороговых значений, определяемых крайними точками $Б$ и $В$ харак-

теристики. Расстояние между этими точками обозначается буквой γ и носит название напряжения гистерезиса. Оно зависит от коэффициента усиления и тем больше, чем больше коэффициент усиления.

Электронное реле на два положения

Итак, двухкаскадный усилитель с положительной обратной связью — это устройство, которое может находиться в двух устойчивых состояниях, причем переходит из одного состояния в другое скачком. Предположим, что выходы такого устройства — это контакты реле. В одном устойчивом положении на первом «контакте» (левом) напряжение мало (левая лампа открыта), а на другом «контакте» напряжение велико (правая лампа закрыта). Переключающий импульс опрокидывает устройство, в электрическом смысле этого слова, и тогда на левом «контакте» напряжение становится большим, а на правом «контакте» малым. По-моему, это напоминает работу реле!

Подключите, например, к выходам спускового устройства сетки электронных ламп (конечно, через специальные цепи). Схему надо составить таким образом, что когда напряжение на «контакте» мало, подключенная к нему лампа заперта, а когда напряжение на «контакте» велико — в результате опрокидывания реле — эта лампа открывается. Пусть эти подключенные к выходам спускового устройства лампы — входные каскады усилителя. На вход одного каскада подан один сигнал, на вход другого каскада — другой сигнал. Тогда «переключение» спускового устройства из одного устойчивого состояния в другое будет подключать к усилителю то один сигнал, то другой в зависимости от того, лампа какого входного каскада усилителя в данный момент открыта, причем такое переключение можно производить за миллионные доли секунды и очень часто, с частотой в десятки и сотни килогерц. Как видите, спусковые устройства — реле в полном смысле слова и с замечательными свойствами.

Рассмотрим практическую схему спускового устройства с анодно-сеточными связями, показанную на рис. 60 (форму напряжений в различных участках схемы см. на рис. 60,*б*). После подачи напряжения питания устройство переходит в состояние, при котором одна из ламп открыта (например, $Л_2$), а другая — закрыта. В таком положении устройство остается сколько угодно долго. Если теперь на сетку лампы $Л_1$ подать положительный импульс, то после достижения потенциала отпирания лампы напряжение на аноде лампы $Л_1$ начнет уменьшаться. Уменьшится напряжение и на сетке лампы $Л_2$, а напряжение на ее аноде увеличится. Через цепь R_1—R_2 увеличивающееся напряжение с анода этой лампы поступит на сетку лампы $Л_1$ и т. д., т. е. начнется лавинообразный процесс, и устройство перейдет в другое состояние, когда лампа $Л_1$ открыта, а лампа $Л_2$ закрыта. Оно будет сохраняться до прихода следующего, теперь уже отрицательного, запускающего импульса, который закроет лампу $Л_1$, переведя схему в исходное состояние.

Отрицательное смещение на сетках ламп в рассматриваемой схеме создается за счет прохождения анодных токов ламп через сопротивление $R_к$. Так как сумма токов ламп в процессе работы

устройства практически остается постоянной (она незначительно меняется лишь в момент опрокидывания схемы), то емкость конденсатора $C_к$ может быть небольшой. Конденсаторы C_1 и C_2 (порядка 15—150 *пф*) сокращают время перехода из одного состояния в другое. В момент опрокидывания резкие скачки напряжения на анодах ламп будут почти полностью передаваться на сетки через емкостные делители, образуемые конденсатором C_1 (или C_2) и входной емкостью лампы, так как для импульсного напряжения сопротивление этих емкостных делителей значительно меньше, чем делителей R_1—R_2.

Запускающее напряжение $u_{зап}$ подается на сетку лампы $Л_1$ через конденсатор C_3, который через внутреннее сопротивление источника этого напряжения оказывается подключенным парал-

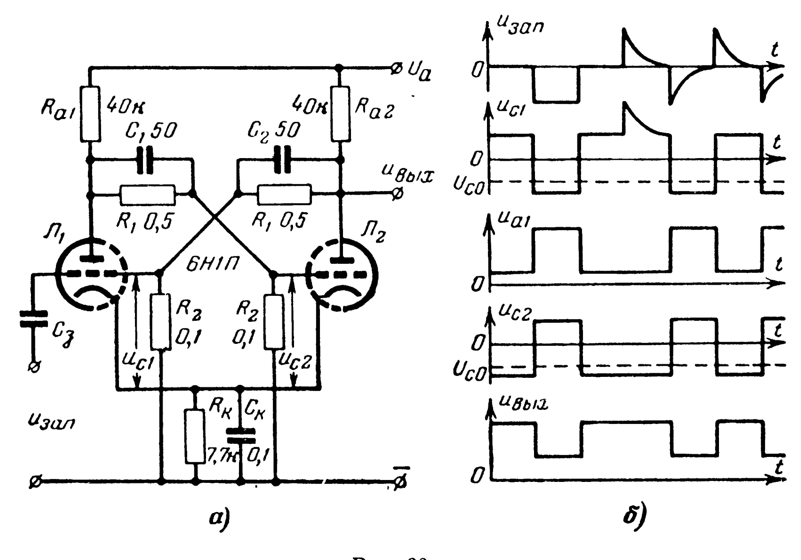


Рис. 60.

лельно входной емкости лампы. Чтобы не увеличивать длительность опрокидывания устройства, емкость этого конденсатора должна быть малой (10—30 *пф*). Желательно, чтобы запускающее напряжение имело вид коротких остроконечных импульсов. При прямоугольной форме сигналов запуска возможно обратное срабатывание спускового устройства от второго перепада управляющего напряжения, дифференцированного в сеточной цепи лампы $Л_1$. Управляющие импульсы в обычных условиях выбираются не короче 1—2 *мксек*, иначе напряжение обратной связи не успеет вырасти настолько, чтобы после окончания действия управляющего импульса поддерживался режим перехода из одного состояния в другое, и опрокидывания не произойдет.

Если спусковое устройство должно срабатывать от импульсов одинаковой полярности, то они подаются через конденсаторы одно-

временно на сетки или аноды обеих ламп. В этом случае их лучше подавать через разделительные диоды (рис. 61) При отсутствии управляющих импульсов падения напряжения на сопротивлении R_3 не происходит, и оба диода заперты вследствие того, что их катоды находятся под положительным потенциалом относительно анодов (из-за падения напряжения на сопротивлениях R_{a1} и R_{a2}). В момент подачи отрицательного управляющего импульса диод, анод которого присоединен к аноду открытой лампы, остается запертым.

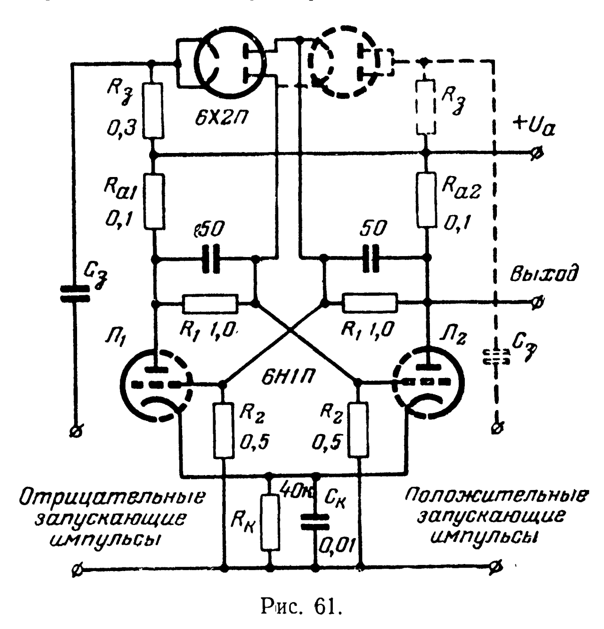


Рис. 61.

Второй же диод открывается, и на анод запертой лампы подается отрицательный управляющий импульс. Затем через делитель R_1—R_2 он поступает на сетку открытой лампы и вызывает опрокидывание схемы.

Эти же рассуждения справедливы и для положительных управляющих импульсов, но в этом случае необходимо изменить полярность включения диодов. При отсутствии управляющих импульсов через диод, катод которого присоединен к аноду открытой лампы, проходит ток. При этом на сопротивлении R_3 создается падение напряжения, и анод второго диода, катод которого присоединен к аноду закрытой лампы, оказывается под отрицательным потенциалом по отношению к катоду (диод заперт). Поэтому положительный управляющий импульс может пройти только через открытый диод на анод открытой лампы, а оттуда через цепь R_1—R_2 на сетку закрытой лампы и вызвать опрокидывание устройства.

Запуск через разделительные диоды обладает еще тем преимуществом, что конденсатор C_3 оказывается подключенным к лампам

спускового устройства только в начале опрокидывания, так как скорость нарастания напряжения на аноде лампы, к которой подключен проводящий диод, значительно больше скорости нарастания управляющего напряжения, и диод уже в самом начале опрокидывания оказывается запертым. Этим достигается развязка цепей запуска от спускового устройства, т. е. исключено их взаимное влияние.

В последнее время в электронных реле стали широко применять полупроводниковые триоды и диоды. Преимущества полупро-

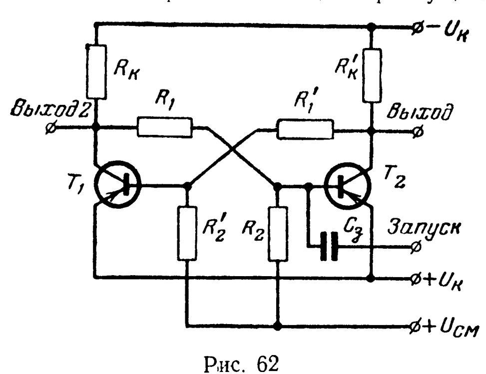


Рис. 62

водниковых приборов — их малые габариты, малая потребляемая мощность и особенно отсутствие накаливающейся нити катода, благодаря чему они не требуют времени на разогрев и всегда готовы к работе — все это особенно ценные качества для работы в схемах электронных реле. Естественно, что принципы работы электронных реле на полупроводниках аналогичны принципам соответствующих ламповых устройств. Например, если открыт левый полупроводниковый триод T_1 (рис. 62), то с делителя напряжения R_1—R_2, включенного между коллектором триода T_1 и источником положительного смещения, на базу триода T_2 подается положительный потенциал, который закрывает этот триод. Напряжение с коллектора триода T_2, почти равное отрицательному напряжению источника питания, поступает через делитель напряжения R'_1—R'_2 на базу триода T_1 и тем самым надежно его открывает. Схема, таким образом, находится в одном из устойчивых состояний.

Для перевода схемы электронного реле в другое устойчивое состояние надо приложить к базе закрытого триода короткий отрицательный импульс или к базе открытого триода — положительный импульс.

Для работы такой схемы электронного реле на транзисторах требуется источник смещения. Однако существуют схемы, которые, как мы уже знаем, не требуют такого источника, например схема с автоматическим смещением, показанная на рис. 63,*а*.

Работа схемы рис. 63,*б* основана на том явлении, что при незначительном напряжении на базе триода (порядка 0,2—0,3 *в*) триод практически остается закрытым. Поэтому в данной схеме величины сопротивлений $R_1 = R'_1$ выбраны такими, чтобы через базу

открытого триода протекал ток, равный $I_к/\beta$ ($I_к$ — ток коллектора, β — коэффициент усиления по току). Тогда напряжение на коллекторе открытого триода (например, T_1) и на базе другого триода (T_2) будет невелико. Поэтому ток базы последнего триода отсутствует, и триод находится в закрытом состоянии.

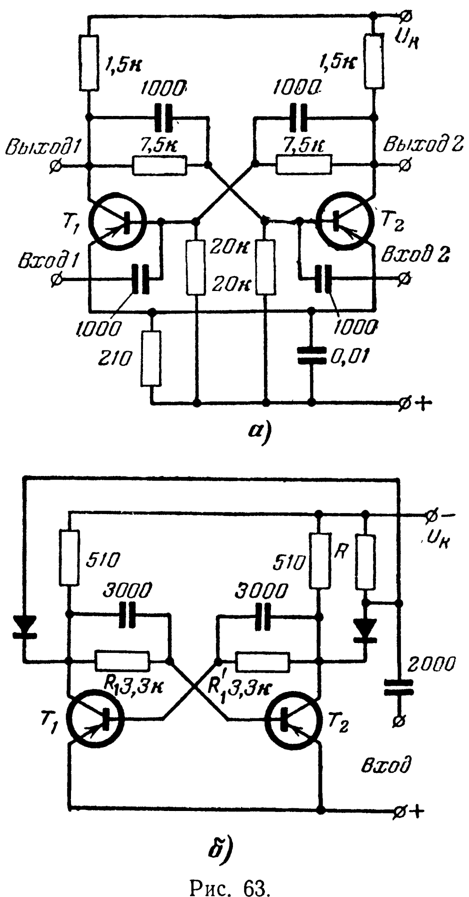


Рис. 63.

Несколько слов о запуске спусковых (или, как их чаще называют, триггерных) схем на полупроводниках. Выше говорилось, что в некоторых случаях требуется осуществлять запуск от каждого импульса одной и той же полярности. Для этого мы подавали управляющие импульсы через разделительные конденсаторы или диоды одновременно на аноды или сетки обеих ламп спускового устройства. Все, о чем при этом говорилось, полностью относится и к устройствам на полупроводниках.

Для электронного реле на полупроводниковых триодах можно применить схему триггера с непосредственной связью коллекторной цепи одного транзистора с базой другого транзистора (рис. 64). Работает эта схема следующим образом. Предположим, что триод T_2 открыт, напряжение на его коллекторе мало и поэтому неспособно открыть триод T_1. На коллекторе этого триода повышенное

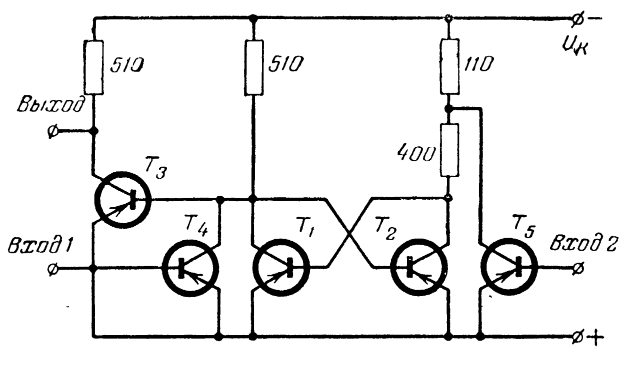


Рис. 64.

напряжение, которое в свою очередь поддерживает открытым триод T_2. Чтобы триггер опрокинулся, надо понизить напряжение на базе открытого триода или, что то же, понизить напряжение на коллекторе закрытого триода. Для этого на базу управляющего транзистора T_4 подают отрицательный сигнал. Триод полностью открывается, и напряжение на его коллекторе падает почти до нуля. В результате напряжение на базе открытого до этого триода T_2 также понижается, триод закрывается, а триод T_1 открывается, т. е. происходит опрокидывание схемы. Триод T_5 играет ту же роль, что и T_4, а T_3 — выходной триод.

Исходное положение: „выключено"

Схемы электронных реле, которые мы только что рассмотрели, как бы имитируют двухпозиционные электромеханические реле. Однако электронные реле могут быть однопозиционными, т. е. обладать только одним исходным положением, только одним устойчивым состоянием. Такие схемы электронных реле часто называют ждущими мультивибраторами, или триггерами с одним устройчивым состоянием. Принцип их работы заключается в следующем. В исходном положении, как я уже сказал, устройство находится в устойчивом состоянии. В момент прихода запускающего напряжения устройство скачком переходит во временноустойчивое состояние, из которого спустя некоторое время вновь возвращается скачком в прежнее устойчивое состояние. Каждому запускающему импульсу соответствует один импульс на выходе устройства (поэтому такие устройства иногда называют однопериодными мультивибраторами).

Рассмотрим работу схемы такого электронного реле (рис. 65). Форма напряжений на различных участках этой схемы показана на рис. 65,*б*. Предположим, что в результате предыдущего скачка лампа $Л_1$ находится в открытом состоянии. Напряжение на ее аноде мало и недостаточно для компенсации отрицательного напряжения от источника — $E_с$. Поэтому лампа $Л_2$ заперта, а конденсатор C заряжен до напряжения $U_а$. Напряжение на сетке лампы $Л_1$

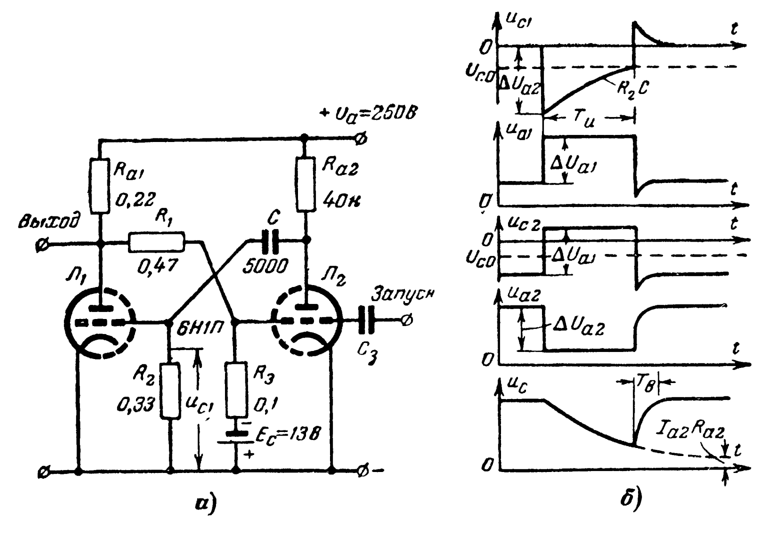


Рис. 65.

равно нулю. В таком положении схема может оставаться сколько угодно долго. Запуск производится положительным импульсом, поступающим на сетку лампы $Л_2$ (или отрицательным — на сетку лампы $Л_1$). Амплитуда импульса должна быть такой, чтобы суммарное напряжение на сетке лампы $Л_2$ стало меньше потенциала запирания. При этом лампа откроется, и начнется разряд конденсатора C. Ток разряда проходит через лампу и сопротивление R_2, создавая на нем падение напряжения, отрицательное по отношению к сетке лампы $Л_1$. Это вызовет уменьшение тока лампы $Л_1$, увеличение напряжения на ее аноде, а следовательно, дальнейшее уменьшение отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_2$ и т. д. Развивается цепная реакция, в результате которой происходит скачок, лампа $Л_1$ закрывается, а лампа $Л_2$ открывается.

В таком состоянии мультивибратор будет находиться до тех пор, пока ток разряда конденсатора C не упадет настолько, что отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_1$ станет меньше потенциала запирания. При этом лампа $Л_1$ откроется, напряжение на ее аноде уменьшится, а это вызовет уменьшение напряжения на сетке лампы $Л_2$ и т. д. В результате развившегося скачка устройство вернется в прежнее устойчивое состояние.

Таким образом, процесс работы ждущего мультивибратора делится на два этапа: формирование выходного импульса, а затем восстановление исходного состояния, так как после обратного опрокидывания мультивибратор не сразу готов к новому переключению. Ему необходимо некоторое время на то, чтобы в схеме закончились переходные процессы: конденсатор C должен зарядиться до напряжения источника питания $U_а$ через сопротивление $R_{а2}$ анодной нагрузки и сопротивление участка сетка — катод лампы $Л_1$. Этап формирования импульса состоит из начального опрокидывания, разряда конденсатора C через сопротивление R_2 и участок анод — катод лампы $Л_2$ и обратного опрокидывания. Длительность опрокидывания обычно очень мала, поэтому длительность выходного импульса зависит в основном от продолжительности разряда конденсатора C:

$$T_и = R_2 C \ln \frac{U_а - I_{02} R_{а2}}{U_{с01}}.$$

Эта формула не учитывает влияния внутреннего сопротивления лампы $Л_2$, через которое проходит ток разряда конденсатора, но для прикидочных расчетов она пригодна.

Этап восстановления заключается в заряде конденсатора C до напряжения $U_а$. Так как заряд происходит через сопротивление участка сетка—катод открывшейся лампы $Л_1$, которое много меньше сопротивления R_2, то длительность заряда конденсатора меньше длительности разряда и обычно составляет $T_в \approx 4,6\ R_{с-к1} C$.

На рис. 66,*а* показана схема ждущего мультивибратора с катодной связью — одна из наиболее распространенных схем однопозиционного электронного реле, а форма напряжений на различных участках схемы — на рис. 66,*б*. В устройчивом состоянии лампа $Л_2$ открыта, так как ее сетка через большое сопротивление R_1 присоединена к плюсу анодного напряжения Потенциал сетки относительно катода близок к нулю, ибо сопротивление участка сетка — катод открытой сейчас лампы $Л_2$ много меньше сопротивления R_1. Через лампу $Л_2$ проходит ток I_{02}, который создает на сопротивлении $R_к$ напряжение, запирающее лампу $Л_1$. Конденсатор C при этом заряжен через цепь $R_{а1}$, участок сетка — катод лампы $Л_2$ и сопротивление $R_к$ до напряжения $U_а$—$I_{02}R_к$. Напряжение $U_р$ выбрано таким, что оно недостаточно для отпирания лампы $Л_1$, поэтому в таком положении мультивибратор может оставаться сколько угодно долго.

Для запуска надо подать на сетку лампы $Л_1$ положительное напряжение такой амплитуды, чтобы суммарное напряжение на сетке лампы стало меньше потенциала запирания. Тогда начнется разряд конденсатора C через открывающуюся лампу $Л_1$ и сопротивление R_1. В результате напряжение на сетке лампы $Л_2$ становится отрицательным, анодный ток этой лампы падает, а значит, уменьшается напряжение на сопротивлении $R_к$, отрицательное по отношению к сетке лампы $Л_1$. Происходит скачок, и лампа $Л_2$ закрывается. В таком состоянии устройство остается до тех пор, пока ток разряда конденсатора C не упадет настолько, что отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_2$ станет меньше потенциала запирания. В этот момент лампа откроется. Ее анодный ток создаст на сопротивлении $R_к$ дополнительное падение напряжения,

которое вызовет уменьшение анодного тока лампы $Л_1$ и увеличение напряжения на ее аноде. В свою очередь это приведет к дальнейшему уменьшению отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_2$ и т. д. Происходит скачок, лампа $Л_1$ запирается, а лампа $Л_2$ открывается. На этом заканчивается цикл работы устройства, которое остается в устойчивом состоянии до прихода следующего запускающего напряжения.

Длительность импульса на выходе устройства определяется не только постоянной времени R_1C, но зависит и от величины напря-

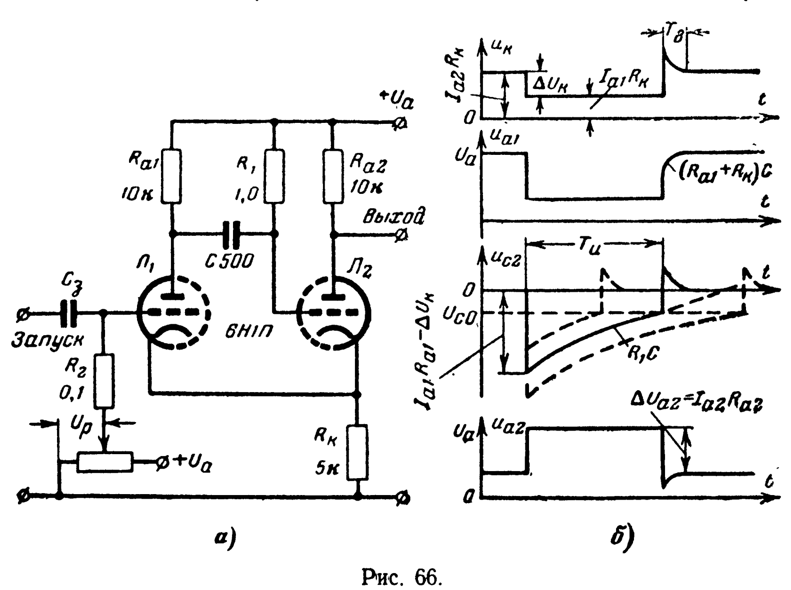


Рис. 66.

жения $U_р$. Отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_2$ достигнет потенциала отпирания тем скорее, чем меньше будет скачок этого напряжения в момент первого опрокидывания. Величина этого скачка равна скачку напряжения $I_{а1}R_{а1}$ на аноде лампы $Л_1$. Таким образом, чем больше ток $I_{а1}$ лампы $Л_1$, тем больше длительность выходного импульса. Величина тока зависит от напряжения на сетке этой лампы, а следовательно, от напряжения $U_р$. Изменяя $U_р$, можно регулировать длительность выходного импульса (рис. 66,*б*). Чем больше это напряжение, тем больше длительность импульса $T_и$. Время $T_и$ можно регулировать также изменением сопротивления $R_к$, ибо при этом тоже изменяется ток лампы $Л_1$. После обратного опрокидывания устройство не сразу готово к новому запуску, так как необходимо, чтобы сначала закончился заряд конденсатора C. Заряд происходит через сопротивление $R_{а1}$ и участок сетка — катод открытой лампы $Л_2$, а также через сопротивление $R_к$. Поэтому заряд заканчивается быстро, не дольше 20% от длительности $T_и$ выходного импульса.

Амплитуда запускающего положительного импульса должна быть такой, чтобы закрытая до этого лампа $Л_1$ открылась. Она зависит от величины напряжения $U_р$ и изменяется с изменением длительности выходного импульса. Обычно амплитуда запускающего импульса не превышает десятка вольт.

Анодные сопротивления $R_а$ берутся в пределах 5—10 *ком*. Величина сопротивления R_1 выбирается до 2 *Мом*, а емкость конденсатора C — от сотен до нескольких десятков тысяч пикофарад.

На рис. 67 показана схема триггера с одним устойчивым состоянием, собранная на полупроводниковых триодах. В устойчивом

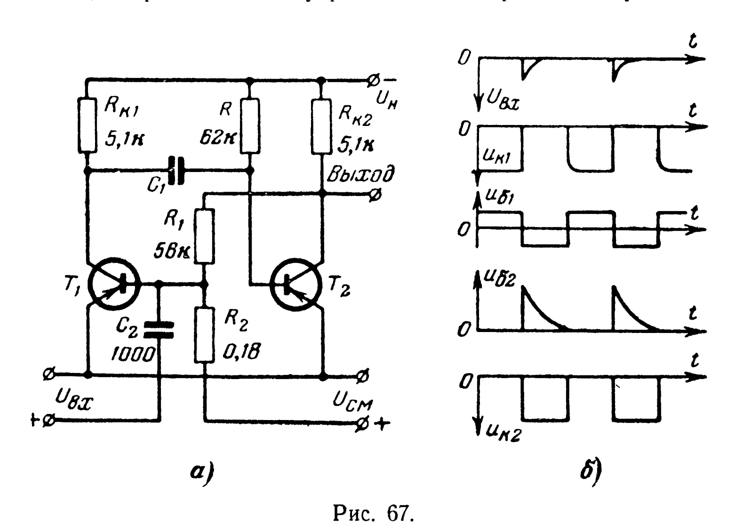


Рис. 67.

состоянии триод T_2, база которого соединена через сопротивление R непосредственно с минусом источника питания, открыт, а триод T_1 закрыт. В момент прихода отрицательного запускающего импульса на базу триода T_1 или положительного запускающего импульса на базу триода T_2 устройство переходит в неустойчивое состояние. При этом триод T_1 начинает проводить ток, и изменение напряжения на его коллекторе передается через конденсатор C_1 на базу триода T_2. Нарастающий лавинообразный процесс, возникающий за счет обратной связи, приводит к полному закрытию триода T_2 и полному открытию триода T_1. В таком состоянии устройство будет находиться до тех пор, пока конденсатор C_1 не разрядится через коллектор открытого триода T_1, сопротивление R и входное сопротивление триода T_2. Как только это произойдет, на базе триода T_2 установится отрицательное напряжение. Тогда этот триод откроется и в свою очередь закроет триод T_1.

Таким образом, на выходе устройства создаются импульсы: на коллекторе триода T_2 — отрицательные, а на коллекторе триода T_1 — положительные.

Переключатель — магнитный поток

В последнее время большое распространение получил совершенно новый вид реле — магнитные переключающиеся элементы. Реле этого типа совершили буквально переворот в вычислительной технике, позволив заменить громоздкие и относительно маловадежные электронные лампы. Даже с транзисторными электронными реле они конкурируют вполне успешно как в отношении габаритов, так и в отношении большой надежности.

Если помните, я уже рассказывал о новых магнитных материалах — ферритах; упоминал и о пермаллоях. Так, вот, на основе этих магнитных материалов созданы бесконтактные магнитные реле, аналогичные электронным спусковым устройствам или триггерам, так как они имеют два устойчивых магнитных состояния.

Основой этих переключающих устройств являются магнитные торы, или, проще сказать, магнитные кольца прямоугольного сечения диаметром в несколько миллиметров. Они бывают двух видов: ленточные из пермаллоя или перминвара и прессованные из феррита. Ленточные состоят из нескольких витков очень тонкой ленты (толщина ленты всего несколько микрон), намотанной на керамическую бобину, которая предохраняет витки ленты от деформации. Магнитные торы отличаются от обычных магнитных сердечников тем, что имеют гистерезисную петлю почти прямоугольной формы (рис. 68). Такая форма петли позволяет им скачком переходить от намагниченности одного знака к намагниченности другого знака.

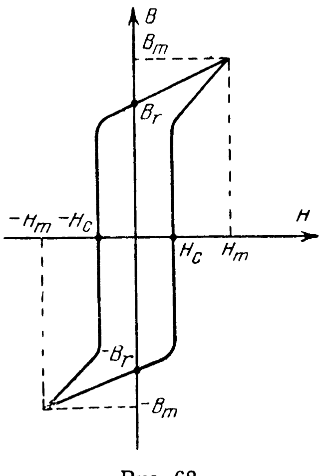


Рис. 68.

На торы наматывают три обмотки из очень тонкого медного провода (обычно на принципиальных схемах торы с обмотками обозначают так, как показано на рис. 69, причем точкой обозначают начало обмотки). Работает такое магнитное переключающее устройство следующим образом.

Предположим, что на первую (входную) обмотку подан импульс тока. В результате этого тор намагнитится до насыщения в одном из направлений, например до значения $+B_m$ (рис. 68). Когда импульс тока окончится (или ток будет выключен, если намагничивание производится обычным постоянным током), намагниченность тора изменится весьма незначительно — до состояния $+B_r$ и тор останется в этом состоянии сколько угодно долго.

Если теперь пропустить ток через третью обмотку, то магнитное состояние тора изменится на противоположное, так как ток по отношению к току в первой обмоке будет иметь обратное направление (обмотки *1* и *3* включены навстречу друг другу). Конечно, изменение магнитного состояния тора произойдет не мгно-

венно: после включения тока в обмотку *3* магнитный поток в торе вначале будет убывать медленно, но как только достигнет перегиба петли гистерезиса, ток скачком перейдет в положение противоположной намагниченности, и магнитный поток в нем получит значение — B_m. После прекращения тока в третьей обмотке магнитный поток в торе чуть-чуть уменьшится — до значения — B_r, и устройство останется в этом положении сколько угодно долго.

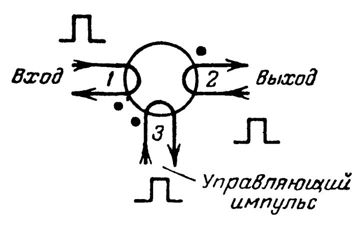


Рис. 69.

Но одновременно с появлением тока в третьей обмотке в результате перемагничивания тора в обмотке *2* индуктируется выходное напряжение. Таким образом, каждый раз, когда тор под действием входного импульса перемагничивается, на выходе устройства будет появляться выходной импульс. Но тор будет перемагничиваться только в том случае, если управляющий импульс иной полярности, нежели предыдущий, или если он появляется в той же полярности, но в другой входной обмотке. Если же это условие не соблюдается, то перемагничивания тора не происходит и выходной импульс в обмотке *2* отсутствует.

Это очень ценное свойство магнитных бесконтактных реле — способность запомнить полярность входного импульса и обмотку, в которой он появился. Особенно оно ценно в вычислительной технике.

А ЧТО ДАЛЬШЕ?

Итак, вы познакомились с азбукой автоматики, и хотя в этой азбуке всего три слова — датчик, усилитель и реле, но вы знаете, какие сложные и замечательные устройства за ними скрываются.

Датчик, реле и усилитель находятся в любом автоматическом устройстве. Это его глаза, его память, его электронные мышцы. И все же это лишь отдельные кубики. Сами по себе, без взаимодействия с другими частями устройства, они ни на что непригодны. И только когда мысль конструктора свяжет эти разрозненные детали в единое целое, рождается удивительный автомат, способный помочь человеку, облегчить его труд.

Как же из разрозненных деталей создать автомат? Какие они бывают — автоматы? Какие у них возможности, где границы их применения? Могут ли они самостоятельно думать и иметь собственную волю, или автоматы — это только механические куклы, жалкое подобие человека?

Это сложные вопросы. Но теперь вы уже достаточно подготовлены, чтобы серьезно познакомиться с автоматикой и телемеханикой. И когда вы освоите эти науки, то поймете, почему рождение кибернетики ученые считают одним из величайших событий нашего века.

СОДЕРЖАНИЕ

КАК ПОЛУЧИТЬ ПИСЬМЕННУЮ РАДИОКОНСУЛЬТАЦИЮ?

Центральный радиоклуб СССР даст платную письменную радиотехническую консультацию. Плата установлена:

а) по 40 коп. за ответ на один из нижеследующих вопросов:

— Сообщение адресов радиотехнических учебных заведений, издательств радиотехнической литературы, магазинов «Книга — почтой», организаций, торгующих радиодеталями, справок по экспонатам всесоюзных радиовыставок; высылку правил получения разрешения на постройку любительских радиостанций, оформления позывного коротковолновика-наблюдателя, любительского радиокода.

б) по 60 коп. за ответ на один из вопросов:

— Указание литературы, в которой можно найти описание нужного радиоприбора (приемника, усилителя, телевизора, магнитофона и др.). Высылку консультационной листовки, наиболее полно освещающей заданный вопрос Рекомендацию книг и брошюр по отдельным отраслям радиотехнических знаний; советы начинающим радиолюбителям, с чего начать свою работу.

в) по 85 коп. за ответ на один из вопросов:

— Разъяснение работы отдельных узлов радиоаппаратуры, возможности замены одних деталей другими, в том числе радиоламп и полупроводниковых приборов, рекомендации по выбору схем радиоаппаратуры с технической оценкой качества их работы.

г) По 1 р. 10 коп. за ответ на один из вопросов:

— Советы по устранению неисправностей в радиоаппаратуре, простейшим переделкам и усовершенствованиям в схемах радиоаппаратуры (без производства технических расчетов), рекомендации по выбору телевизионных антенн для дальнего приема телевидения.

Для получения консультации заказчик должен перевести стоимость ответа на расчетный счет Центрального радиоклуба СССР № 70005 в Бауманское отделение Госбанка г. Москвы и квитанцию об оплате вместе с вопросами по консультации, выслать в адрес Центрального радиоклуба СССР: г. Москва, Сретенка, 26/1.

На бланке почтового перевода делается пометка «плата за консультацию».

Консультация не дает ответов на вопросы, связанные с получением моточных данных и конструктивных размеров различной промышленной и любительской радиоаппаратуры, описания которых не опубликовывались в печати; о дополнительных данных деталей конструкций, опубликованных в различных книгах и брошюрах; не сообщает адресов промышленных предприятий, выпускающих радиоаппаратуру и радиодетали; не высылает книг и брошюр по радиотехнике, не выполняет заказов на высылку радиоаппаратуры и радиодеталей.

Письма без оплаты стоимости консультации к исполнению не принимаются.

Радиотехническая консультация
Центрального радиоклуба

Цена 27 коп.